国际电气工程先进技术译丛

WILEY

智能电网——设计与分析基础

Smart Grid Fundamentals of Design and Analysis

（美）James Momoh 著

张沛超 胡炎 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

关于作者

James Momoh博士，是霍华德大学（Howard University）电气与计算机工程系教授，能量系统与控制中心主任。Momoh博士还是美国邦纳维尔电力局（Bonneville Power Administration，BPA）的首席顾问。他已独著或合著了几本书，如Wiley-IEEE出版社出版的《电能处理系统的运行与控制》（Operation and Control of Electric Energy Processing Systems）、《电力系统市场经济的设计与规划》（Economic Market Design and Planning for Electric Power Systems）。Momoh博士主要从事系统工程、能量系统以及电力市场方面的跨学科研究与教育工作。

国际电气工程先进技术译丛

智能电网——设计与分析基础

（美）James Momoh　著
张沛超　胡　炎　译

机 械 工 业 出 版 社

本书共分11章，其内容来自于大量的教学、会议、研究工作，以及美国和世界各地的学术和工业界就如何实现电网的现代化而进行的研讨。第1章介绍了智能电网架构设计；第2章介绍了智能电网通信与测量技术；第3~5章介绍了智能电网设计过程中所用到的分析工具；第6章讨论了设计智能电网的途径；第7章介绍了与智能电网相关的可再生能源与储能技术；第8章介绍智能电网的互操作、标准与信息安全；第9章内容为针对智能电网的研究、教育与培训；第10章介绍了智能电网案例研究与试验平台；第11章简要介绍智能电网特性和面临的挑战。本书适合从事智能电网工作的专家学者和工程技术人员阅读，也适合作为高等院校相关专业的教材。

Copyright © 2012 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis >, ISBN <978-0-470-88939-8>, by < James Momoh >, Published by John Wiley & Sons, Ltd. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版，未经出版者书面允许，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有，翻印必究。

本书版权登记号：图字01-2012-4864号。

图书在版编目（CIP）数据

智能电网：设计与分析基础/(美）莫莫（Momoh, J.）著；张沛超，胡炎译. —北京：机械工业出版社，2013.11
(国际电气工程先进技术译丛)
书名原文：Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis
ISBN 978-7-111-44523-4

Ⅰ.①智…　Ⅱ.①莫…②张…　Ⅲ.①智能控制-电力系统　Ⅳ.①TM76

中国版本图书馆CIP数据核字（2013）第252266号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号　邮政编码100037）
策划编辑：刘星宁　责任编辑：刘星宁　版式设计：霍永明
责任校对：刘怡丹　封面设计：赵颖喆　责任印制：杨　曦
保定市中画美凯印刷有限公司印刷
2014年1月第1版第1次印刷
169mm×239mm·11.5印张·229千字
0001—4000册
标准书号：ISBN 978-7-111-44523-4
定价：58.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
社服务中心：(010) 88361066	教材网：http://www.cmpedu.com
销售一部：(010) 68326294	机工官网：http://www.cmpbook.com
销售二部：(010) 88379649	机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：(010) 88379203	**封面无防伪标均为盗版**

前　言

智能电网是指采用动态优化技术、具有自愈能力的电网，该电网能够利用实时测量技术，使网络损耗最小化、维持电压水平、提高系统可靠性以及改善资产管理。系统运行人员利用智能电网及其子系统收集的运行数据，可以在系统遭遇各种事故时快速识别最佳方案来防御攻击并恢复系统的正常运行。但是，智能电网技术的实施，首先需要研究、确定其关键的性能评价指标，设计、测试适当的工具，开发合适的课程体系以对现有和未来的人员进行教育，使其掌握实施此类高级系统的知识与技能。

本书的目的，是使读者掌握智能电网的基础理论知识、设计工具、研究现状、发展中的关键问题以及发展前景。本书共分11章，其内容来自于大量的教学、会议、研究工作，以及美国和世界各地的学术和工业界就如何实现电网的现代化而进行的研讨。例如，第3章所讨论的最优化工具，就专门针对电网的随机性特点并满足自适应要求和预测要求。该章详细介绍的最优潮流，能够基于实时测量数据，利用学习算法，求解出发电、输电、配电、需求响应、网络重构以及自动化功能所需的最优化方案。

我对本书写作过程中给予帮助的人致以谢意。感谢能量系统与控制中心的研究生 Keisha D’Arnaud，为了使本书更适合普通读者，书稿几经修改，而她在此过程中给予了坚持不懈的支持。感谢爱迪生电气研究所的高级执行副总裁 David Owens，以及国家自然科学基金（NSF）电气通信与信息系统（ECCS）项目部主任 Paul Werbos 博士，是他们鼓励并支持我用计算智能方面的知识积累去研究传统技术所无法解决的复杂电力系统问题。尤其在我于2001～2004年担任 NSF 的 ECCS 项目部主任期间，他们给予我的支持使我受益匪浅。还要感谢由 NSF 资助的小额探索性研究项目，该项目资助我开发了第一代的动态随机最优潮流系统，而这个系统可作为智能电网设计与开发中的通用工具。

感谢我的家庭给予我的鼓励与支持。感谢我在能量系统与控制中心的学生与同仁们，他们作为热情的读者，让我得以检验与完善自己关于智能电网的思想。我还对能够荣幸受邀到顶级的公用事业行政管理论坛做报告表示感谢，这使我有机会阐述将智能电网推广至全国的意义。所有这一切，都重新燃起了我设计与开发未来电网的兴趣。

James Momoh

目　　录

前言
第 1 章　智能电网架构设计……… 1
1.1　概述 ……… 1
1.2　现有电网和智能电网的比较 ……… 1
1.3　能源独立和安全法案（2007）：智能电网实施依据 ……… 2
1.4　计算智能 ……… 3
1.5　电力系统改进 ……… 4
1.6　通信与标准 ……… 4
1.7　试验平台 ……… 4
1.8　本书结构 ……… 4
1.9　智能电网各市场驱动力概览 ……… 6
1.10　各利益相关方的角色与职能……… 6
1.10.1　电力公司……… 8
1.10.2　政府实验室与示范项目……… 8
1.10.3　电力系统工程研究中心（PSERC） ……… 8
1.10.4　研究机构……… 9
1.10.5　技术公司、销售商与制造厂……… 9
1.11　基于性能评价的智能电网工作定义 ……… 10
1.12　典型架构 ……… 10
1.13　智能电网各构成组件的功能 ……… 12
1.13.1　智能设备接口组件 ……… 12
1.13.2　储能组件 ……… 12
1.13.3　输电子系统组件 ……… 12
1.13.4　监视与控制技术组件 ……… 12
1.13.5　智能配电网子系统组件 ……… 12
1.13.6　需求侧管理组件 ……… 13
1.14　小结 ……… 13
参考文献 ……… 13
推荐阅读 ……… 13
第 2 章　智能电网通信与测量技术 ……… 14

2.1 通信与测量…… 14
2.2 监视、PMU、智能电表与测量技术…… 16
2.2.1 广域测量系统（WAMS） …… 17
2.2.2 相量测量单元（PMU） …… 17
2.2.3 智能电表…… 18
2.2.4 智能家电…… 19
2.2.5 高级量测体系（AMI） …… 19
2.3 GIS 与谷歌地图工具 …… 20
2.4 多代理系统（MAS）技术 …… 21
2.4.1 用于智能电网的多代理系统…… 21
2.4.2 多代理系统示例…… 22
2.4.3 多代理技术…… 23
2.5 微电网与智能电网的比较…… 23
2.6 小结…… 24
参考文献 …… 24
第3章 用于智能电网设计的性能分析工具 …… 26
3.1 潮流计算研究概述…… 26
3.2 智能电网中潮流计算的挑战以及现有方法的不足…… 26
3.3 潮流计算研究现状：经典与扩展的方程与算法…… 27
3.3.1 高斯-赛德尔方法 …… 27
3.3.2 牛顿-拉夫逊方法 …… 28
3.3.3 快速解耦方法…… 29
3.3.4 配电网潮流方法…… 29
3.4 阻塞管理效果…… 32
3.5 用于智能电网设计的潮流计算…… 33
3.6 随机动态最优潮流（DSOPF）在智能电网中的应用 …… 34
3.7 静态安全评估（SSA）和预想事故分析 …… 35
3.8 预想事故及其分类…… 38
3.8.1 稳态预想事故分析…… 39
3.8.2 性能指标…… 39
3.8.3 灵敏度分析方法…… 40
3.9 智能电网预想事故研究…… 41
3.10 小结 …… 42
参考文献 …… 42
推荐阅读 …… 42

第4章 智能电网稳定性分析工具 …… 44
4.1 电网稳定性概述 …… 44
4.2 现有电压稳定性分析工具的优点与不足 …… 44
4.3 电压稳定性评估 …… 48
4.3.1 电压稳定与电压崩溃 …… 49
4.3.2 电压稳定分类 …… 50
4.3.3 静态稳定性（Ⅰ型不稳定） …… 51
4.3.4 动态稳定性（Ⅱ型不稳定） …… 51
4.3.5 动态电压稳定性研究中的分析技术 …… 51
4.4 电压稳定性评估技术 …… 53
4.5 电压稳定性指标 …… 56
4.6 静态电压稳定性研究中的分析技术 …… 58
4.6.1 用于检测电压崩溃点的直接法 …… 59
4.6.2 非直接法（连续方法） …… 59
4.7 电压稳定性的应用与实施示例 …… 60
4.8 通过电压稳定的预防控制实现稳定性约束优化 …… 61
4.9 功角稳定性评估 …… 63
4.9.1 暂态稳定性 …… 64
4.9.2 应用于实际电力系统的稳定性分析 …… 65
4.9.3 稳定区域的边界 …… 66
4.9.4 主导UEP搜索算法 …… 68
4.9.5 智能电网DSA设计中的过程变化 …… 69
4.10 状态估计 …… 71
4.10.1 加权最小二乘法估计的数学公式 …… 73
4.10.2 坏数据的检测和辨识 …… 74
4.10.3 预估计分析 …… 74
4.10.4 后估计分析 …… 77
4.10.5 鲁棒状态估计 …… 77
4.10.6 智能电网环境下的状态估计 …… 80
4.10.7 实时网络建模 …… 82
4.10.8 智能电网中状态估计实施方法 …… 82
4.10.9 动态状态估计 …… 83
4.10.10 小结 …… 84
参考文献 …… 84
推荐阅读 …… 85

第 5 章　用于智能电网设计的计算工具 …… 86
5.1　计算工具概述 …… 86
5.2　决策支持工具（DS） …… 86
5.3　优化技术 …… 88
5.4　经典优化方法 …… 90
5.4.1　线性规划 …… 90
5.4.2　非线性规划 …… 90
5.4.3　整数规划 …… 91
5.4.4　动态规划 …… 92
5.4.5　随机规划与机会约束规划（CCP） …… 92
5.5　启发式优化 …… 93
5.5.1　人工神经元网络（ANN） …… 94
5.5.2　专家系统（ES） …… 95
5.6　进化计算技术 …… 96
5.6.1　遗传算法（GA） …… 97
5.6.2　粒子群优化（PSO） …… 97
5.6.3　蚁群优化 …… 98
5.7　自适应动态规划技术 …… 99
5.8　Pareto 方法 …… 101
5.9　混合优化技术及智能电网应用 …… 101
5.10　计算挑战 …… 102
5.11　小结 …… 103
参考文献 …… 103
第 6 章　智能电网设计的路径 …… 106
6.1　引言 …… 106
6.2　智能电网发展的障碍和解决方案 …… 106
6.3　基于先进的优化和控制技术的智能电网设计路径 …… 108
6.4　一般层次的自动化 …… 108
6.4.1　可靠性 …… 109
6.4.2　稳定性 …… 110
6.4.3　经济调度 …… 110
6.4.4　机组组合 …… 111
6.4.5　安全性分析 …… 112
6.5　输电层次中智能电网的大型电力系统自动化 …… 112
6.5.1　故障和稳定性诊断 …… 113

6.5.2 无功功率控制 …… 113
6.6 配电系统自动化需求 …… 114
6.6.1 电压无功功率控制 …… 115
6.6.2 电能质量 …… 116
6.6.3 网络重构 …… 117
6.6.4 需求侧管理 …… 117
6.6.5 分布式发电控制 …… 118
6.7 智能电网的终端用户/家用电器层次 …… 118
6.8 自适应控制和最优化方法的应用 …… 118
6.9 小结 …… 119
参考文献 …… 119
推荐阅读 …… 120
第7章 可再生能源与储能 …… 121
7.1 可再生能源 …… 121
7.2 智能电网中可利用的可持续能源 …… 121
7.2.1 太阳能 …… 122
7.2.2 太阳能发电技术 …… 122
7.2.3 光伏系统建模 …… 122
7.2.4 风电机组系统 …… 124
7.2.5 生物质-生物能 …… 126
7.2.6 小型与微型水电 …… 126
7.2.7 燃料电池 …… 126
7.2.8 地源热泵 …… 127
7.3 可持续能源利用中的渗透率与波动性问题 …… 127
7.4 需求响应问题 …… 128
7.5 电动汽车与插电式混合动力电动汽车 …… 129
7.6 插电式混合动力电动汽车技术 …… 130
7.7 环境影响 …… 131
7.7.1 气候变化 …… 131
7.7.2 气候变化的影响 …… 132
7.8 储能技术 …… 132
7.9 税收抵免 …… 136
7.10 小结 …… 137
参考文献 …… 137
推荐阅读 …… 138

第 8 章　互操作、标准与信息安全 …… 139
8.1　引言 …… 139
8.2　互操作性 …… 139
8.2.1　互操作性发展现状 …… 140
8.2.2　互操作性的益处与挑战 …… 140
8.2.3　智能电网环境下的互操作模型 …… 140
8.2.4　智能电网通信网络的互操作性 …… 140
8.2.5　互操作性和电网的控制 …… 141
8.3　标准 …… 141
8.4　智能电网信息安全 …… 143
8.4.1　信息安全发展现状 …… 144
8.4.2　信息安全风险 …… 146
8.4.3　高级量测体系中的信息安全考虑 …… 147
8.4.4　降低信息安全风险的途径 …… 148
8.5　信息安全以及用户可采取的防御措施 …… 148
8.6　小结 …… 149
参考文献 …… 149
推荐阅读 …… 150
第 9 章　智能电网的研究、教育和培训 …… 151
9.1　引言 …… 151
9.2　智能电网的研究领域 …… 151
9.3　智能电网的研究活动 …… 152
9.4　跨学科的研究活动 …… 152
9.5　智能电网教育 …… 153
9.5.1　模块 1：引言 …… 154
9.5.2　模块 2：体系结构 …… 154
9.5.3　模块 3：功能 …… 154
9.5.4　模块 4：工具和技术 …… 154
9.5.5　模块 5：设计途径 …… 155
9.5.6　模块 6：可再生能源技术 …… 155
9.5.7　模块 7：通信技术 …… 155
9.5.8　模块 8：标准、互操作和信息安全 …… 155
9.5.9　模块 9：案例研究和试验平台 …… 155
9.6　培训和职业发展 …… 156
9.7　小结 …… 156

参考文献…… 156
第 10 章 智能电网的案例研究和试验平台 …… 157
10.1 引言…… 157
10.2 示范工程…… 157
10.3 高级计量…… 157
10.4 含可再生能源的微网…… 158
10.5 电力系统的机组组合问题…… 159
10.6 用于配网自动化最优网络重构的自适应动态规划…… 163
10.7 可再生能源接入的案例研究…… 167
10.7.1 智能电网行动描述…… 167
10.7.2 智能电网应用的实施方法…… 168
10.8 试验平台和评测系统…… 168
10.9 智能输电的挑战…… 169
10.10 智能输电的益处 …… 169
10.11 小结 …… 169
参考文献…… 170
第 11 章 后记 …… 171
附录 缩略语表…… 173

第 1 章　智能电网架构设计

1.1　概述

现有电网采用一种由发电、输电、配电等环节构成的垂直结构，并在控制系统和各类设备的支持下实现系统的可靠、稳定和经济运行。然而，系统运行人员正在面临着前所未有的挑战，例如，在现有系统中接入可再生能源、技术的快速革新以及多样化的市场主体和终端用户。作为下一代电网的智能电网，将充分利用通信手段和实时测量技术来提高系统的适应性和预测能力，抵抗来自内部和外部的安全威胁。智能电网的设计框架是基于对现有电力行业的拆分、重组以及资产优化。这个新一代的电网将能够：

1）处理调度计划和跨区能量传输中的不确定性；

2）接纳可再生能源；

3）优化输配电网络的传输容量，满足对电能质量和可靠性的日益增长的需求；

4）应对系统运行中出现的难以预料的事件和各种不确定性，并积极地进行规划。

1.2　现有电网和智能电网的比较

如上所述，现有电网中存在一系列因素使其不能有效地满足供电可靠性的要求。表 1.1 将现有电网和智能电网做了比较。

表 1.1　现有电网和智能电网的比较[4]

期望的特点	现有电网	智能电网
用户的主动参与	信息对用户不透明，用户不能参与互动	提供充分的信息，用户通过需求响应和分布式能源主动参与互动
兼容所有发电和储能形式	以集中式发电为主，分布式能源的接入存在很多障碍	存在大量“即插即用”、可再生的分布式能源
新产品、服务和市场	有限的、集成度很差的趸售市场；用户有限的参与机会	成熟、高度集成的趸售市场；新兴电力市场的增长
为数字经济提供高质量电能	重点关注停运，而对电能质量问题则响应很慢	优先保证电能质量，有各种各样的质量/价格方案可供选择，快速处理问题
资产优化利用和高效运行	运行数据与资产管理缺乏集成，业务流程陷入筒仓模式	极大扩展了电网参数的采集范围；注重事故预警，以尽量减少对用户的影响
对系统扰动的预测与应变能力（自愈能力）	立足于防止事故的进一步扩大；强调故障后对资产的保护	对事故的自动检测和响应；通过持续的预测分析来防患于未然
抵御信息攻击与自然灾害的能力	易受到恐怖袭击和自然灾害的影响，响应速度慢	对信息攻击与自然灾害具有抵御能力，快速的系统恢复能力

1.3　能源独立和安全法案（2007）：智能电网实施依据

在美国前总统 George W. Bush 签署的 2007 能源独立和安全法案（EISA）中对智能电网做了生动的描绘：智能电网应能够有效而可靠地实施预测、实现自适应和自重构。如该法案中所概括的，美国电网的现代化目标就是为了维护一个可靠而安全的电力基础设施[2]，以满足未来需求增长的要求。图 1.1 说明了推进这样一个



图 1.1　智能电网的基本特征

高效、可靠系统发展所需的一系列特性。

本法案成立了一个智能电网专门委员会，其职责是“确保原本分散在能源部以及联邦政府其他部门中的、与智能电网相关的技术与实践活动得以彼此沟通、协同与整合”[1]。专门委员会的任务包括：研究与开发；开发广为接受的标准与协议；厘清智能电网技术实践与电力公司管制之间、智能电网技术实施与基础设施开发、系统可靠性和安全性之间以及智能电网技术实践与电能供需、传输、分配乃至政策等方方面面的关系。针对这项法案，美国的研究与教育团体正在积极参与：

1）智能电网研发项目；

2）开发广为接受的智能电网标准和协议㊀；

3）开发满足智能电网实施条件的基础设施；

4）开发系统可靠性与安全性的保障技术；

5）制定政策，鼓励为智能电网的发、输、配诸环节提供技术支持。

智能电网开发与实施中有 5 个关键方面，如图 1.2 所示。

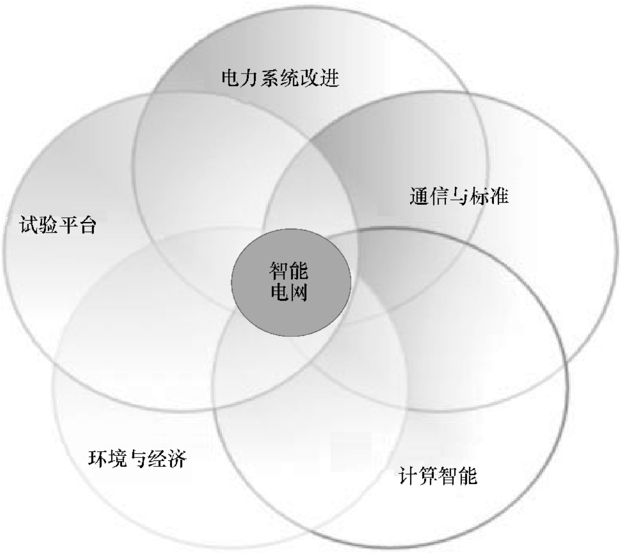


图 1.2　智能电网实施的 5 个关键方面

1.4　计算智能

在本书中，“计算智能”特指对大电网进行优化所需的一系列高级分析工具，如基于启发式或进化理论的规划软件、决策支持工具以及自适应优化技术。

㊀ 原文此处为保护（protection），依上下文应为协议（protocol）。——译者注

1.5 电力系统改进

决策者们认为，在全美广泛采用可再生能源[4,5]，将有助于减少热能和化石能源消耗产生的碳排放，满足需求的不确定性的要求，并在一定程度上提高电能输送的可靠性。

1.6 通信与标准

由于电网运行规划的时间尺度可能短至1h，智能电网的高级自动化系统会在快速的决策过程中产生海量运行数据。利用新算法可使智能电网具备更强的自适应性和预测能力，这样，就需要为电网的管理、运行和市场营销所需的通信网络制定新的规范。

1.7 试验平台㊀

以上对智能电网的特征作了讨论。只有评估当前电网和拟建的智能电网，才可以充分显示智能电网的特点和所面临的挑战。这样的智能电网系统一旦被全面实现，将允许用户参与互动，并在高级软件的支持下提高发、输电能力，降低电网的脆弱度，保证适应性、可靠性、充裕度和电能质量。培训工具的开发和电网运行管理所需的技能培训都会创造许多新的就业机会，这也是智能电网发展的重要目标之一。如今，智能电网将在试验平台和示范项目中进行测试。为了尽快建成第一代智能电网，相关的试验平台和研究中心应开展跨学科合作。

为消除导致系统脆弱性的根源，电力公司和智能电网技术厂家应重点关注系统安全控制，不能仅仅盯住局部的脆弱性和威胁。但是，在现有系统上很难甚至不可能增加安全控制，理想的做法是将其集成到全新的系统中，这样可以避免很多实施上的问题。对于已建成的安全控制中心，还需要对其有效性进行定期评估，以保持智能电网对各种新威胁的抵御能力。

1.8 本书结构

本书共分为11章。本章为概述，讲述智能电网的概念、基本原理、工作定义以及系统架构。第2章介绍了智能电网的通信与测量技术。第3章介绍与潮流计算、最优潮流、预想事故分析等相关的软件工具，而与电压稳定、功角稳定和状态估计等相关的软件则放到第4章介绍。第5章评估了适应智能电网特点的各种计算智能方法。第6章阐述了使用通用动态随机优化技术的智能电网路径设计。第7章

㊀ 原文本节标题为“环境与经济”，此处根据上下文修改为“试验平台”。——译者注

对可再生能源及其波动性、随机性问题作了综述，随后讨论了储能技术及其容量和配置问题。为了评价可再生能源的经济和环境效益，本章还专门讨论了需求侧管理（DSM）和需求响应、气候变化以及税收抵免等几个问题。第 8 章讨论了制定国家标准的重要性。随后又讨论了互操作性问题，分析了在满足系统运行约束的前提下，如何使新技术能易于适配到老系统。为了保护可再生能源的安全利用和通信基础设施，本章还讨论了信息安全问题。为充分发挥新技术的性能优势和经济效益，需要开展一系列重大研究，并且不能忽视职业教育和培训，第 9 章对此作了介绍。第 10 章研究了若干智能电网开发案例，讨论了用于辅助实施的试验平台。在智能电网得以全面实施之前，研究人员和决策者尚面临很多巨大挑战，本章对此作了概括，并呼吁加大投资和开展跨学科合作。图 1.3 是本书各章内容的示意图。



图 1.3　本书各章内容的示意图

1.9 智能电网各市场驱动力概览

出于改善系统效率和可靠性的目的，并受市场和新机遇的驱使，智能电网应具备以下能力：

1）满足进一步集成数字系统的需要，提高电力系统运行效率。在市场竞争环境下，放松管制的电力工业可以在满足系统约束、计及需求的季节性和每日波动的前提下进行市场化改造。竞争市场增大了跨区域的功率交换，这给现今日益老化的电网带来了更大的压力，迫切需要提升实时控制的水平。

2）处理电网阻塞、提高用户参与度、降低投资的不确定性。这些都需要对电网进行增容以提高供电可靠性。

3）无缝接入可再生能源（RES）和分布式发电。大量低成本分布式发电的接入将会改变现有电网的形态。

除了系统运行人员和决策者，各利益相关方也在推动智能电网的发展。下面讨论他们各自的作用以及所承担的具体角色。

1.10 各利益相关方的角色与职能

和分析传统电网一样，分析智能电网的重点也应集中在识别各利益相关方及其在电网发展中的功能。各利益相关方包括电力公司、发电商以及用户、决策者、技术提供商、研究机构等。所有利益相关方的全面参与是促使智能电网成为现实的重要因素。

决策者是指联邦及各州的监管机构，其职责是确保政策的连续性以及协调各方需求。智能电网的发展将带来降低能源价格、减少对外来石油的依存度、提高能效和供电可靠性等好处，各利益相关方将从中获益。各利益相关方的分类如图 1.4 所示。

智能电网发展中还有一些参与者，如政府机构、制造厂以及研究机构。一些政府机构，如联邦政府能源部（DOE）所属的国家可再生能源实验室（National Renewable Energy Laboratory，NREL），以及一些州立机构，如加州能源委员会、纽约州能源研究与开发署等都是智能电网的积极倡导者。在“智能电网概述”这份专题报告中，能源部讨论了智能电网实现的背景、挑战、机遇和必要性。报告中将智能电网定义为这样一种技术：“智能电网改革了整个电力工业，引进了许多理念、概念和技术，把电力公司和电网接入了互联网，实现了电网的现代化”[1]。智能电网的特点包括双向的数字通信、即插即用能力、支持用户参与互动的高级量测体系及相关设施、建立在标准之上的互操作性，以及低成本的通信和电子设备。

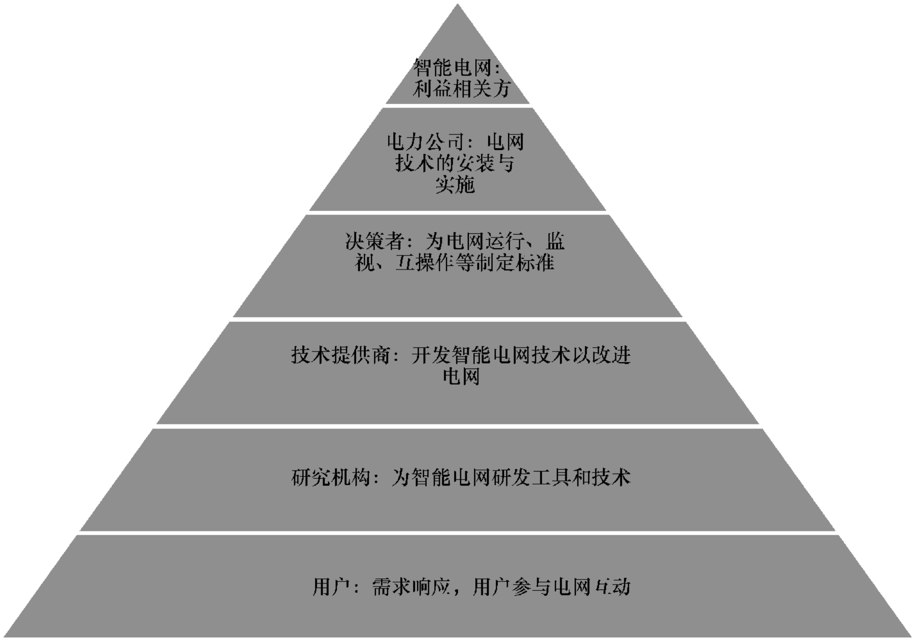


图 1.4　各利益相关方及其职能

智能电网还有其他一些广受认同的特性，如集成高级的电网可视化技术以便实现广域感知，将实时传感数据、天气信息以及电网模型集成到地理信息系统中[1]等。

不过，我们认为智能电网还应具备对供需不确定性的适应能力、具备预测能力和防患于未然的预警能力，对于这些，能源部在其智能电网定义中缺乏相应的考虑。另一个联邦机构，联邦能源监管委员会（Federal Energy Regulatory Commission，FERC）已批准开发如下项目：

1）信息安全：要求 NIST㊀制定一套标准和协议，既能满足信息安全要求，又要满足能源独立和安全法案（EISA）以及联邦能源监管委员会制定的可靠性标准。

2）系统间通信：在大电网各区域市场运营商、电力公司、需求响应集总代理以及用户之间存在各类信息交换，需要制定一套公共信息模型来规范信息交换。

3）广域状态感知：要求为全国各大电网的运行调度人员配备专门的设备，让调度人员能获取系统的全景信息，这样才可以更好地完成系统监视和运行。

4）大电网对新兴技术的兼容与接纳。智能电网应能够接纳越来越多的可再生

㊀ National Institute of Standards and Technology，美国国家标准与技术研究院。——译者注

能源、需求响应资源以及储能装置，这是解决目前大型电力系统所面临挑战的有效措施。而这需要明确相关标准体系的开发。电动交通是另一项新兴技术，它的推广应用也要做到标准先行。

1.10.1　电力公司

南加州爱迪生（South California Edison，SCE）和其他一些电力公司承诺改造现有电表。厂家也正在向基于开放标准的高级计量体系靠拢。这一系列的行动已使得诸如服务质量、节能减耗等指标得到持续改善。

高级量测体系（AMI）是智能电网必不可少的组成部分[5]。PEPCO 控股公司（PEPCO Holdings）一直致力于这项技术的研发，并提出了这样一些理念：提倡并资助围绕终端用户进行的技术创新、倡导高效能源管理、提供多种电价选择方案和需求响应方案、降低总体能源成本、实现节能减排等。

1.10.2　政府实验室与示范项目

在 20 多年前，PNNL 就提出了智能电网的很多基本思想。在 20 世纪 80 年代中期，PNNL 的研究人员设计了第一代的数据采集系统并安装在 1000 余座建筑里，这套系统能够以准实时的方式监视所有电器的用电情况。PNNL 开发了一整套的分析工具与技术，覆盖了从输电层面的相量测量与控制技术一直到位于用户端的电网友好型电器（Grid-Friendly Appliance，GFA）[2]，促进了传感器、故障诊断、设备设计与运行等技术的发展与完善。2006 年 1 月，在其首次报告“电网智能化（GridWise）”概念之后的第四年，PNNL 正式发布了“电网智能化合作倡议”㊀，旨在通过示范工程对新一代电网的相关技术进行验证[3]。该示范工程涉及了来自华盛顿和俄勒冈的 300 个家庭用户。

“电网智能化项目”由设于能源部电气与能源保险办公室的“电网智能化联盟”负责管理。联盟成员包括阿海珐、通用电气、IBM、施耐德电气、美国电力公司（AEP）、美国邦纳维尔电力局（BPA）、ConEd、PJM 互联电网公司、Battelle、RDS、SAIC、Nexgen，以及 RockPort Capital Partners 公司[2]等。智能电网各种应用得以实施，离不开各个自动化系统之间的互操作性。作为智能电网的主要倡导者，电网智能化架构委员会（GridWise Architecture Council，GWAC）[4]正在积极推进此项工作。

1.10.3　电力系统工程研究中心（PSERC）

美国电力系统工程研究中心（Power Systems Engineering Research Center，PSERC）[6]由 13 所大学和若干工业伙伴共同组成，旨在用最新技术解决电网遇到的问题。PSERC 的总体目标是：为电网运行与规划开发新策略、新技术、新的分析手段以及新的计算工具，从而支撑电网的灵活、可靠、稳定运行。

㊀ GridWise Initiative，见 www. pnnl. gov。

1.10.4　研究机构

美国电力科学研究院（Electric Power Research Institute，EPRI）和大学联盟已经为智能电网发展开发了软件架构。这些软件基于电力、通信、计算机控制相互融合的思想，主要用于电网技术框架的开发。EPRI 开发了智慧电网（Intelligrid）软件，这是一个基于开放标准和需求导向的软件，实现了产品与系统间的互操作，整合了数据网络与设备。电力公司在规划、设计、实施 IT 系统时，可以利用这套软件，从中获得标准与技术方面的方法、工具及建议。

1.10.5　技术公司、销售商与制造厂

在全球范围内，IBM 公司是为智能电网提供信息技术（IT）类设备的主要供货商。在 2008 年，IBM 公司被美国电力公司（AEP）、密歇根煤气与电力公司以及用户能源（Consumers Energy）公司列为智能电网能效项目的优先 IT 支持服务商。IBM 公司负责的智能电网（GridSmart）项目可以显示出能源使用情况以及是否参与能效项目。IBM 公司在其中充当系统集成商的角色。IBM 公司还提出了智慧电网（Intelligent Power Grid）的概念，其要点可概括为：利用现代的数据集成与分析技术提高电网的可观测性，支撑高级的电网运行与控制；建立集成的电能传输链；具备高级电力公司战略规划功能[7]。以下为智慧电网的主要特点：

1）电网设备和资产中嵌入智能的 IP 使能装置（数字处理器），或被这样的装置所监视。

2）通过数据通信网，智能装置能够在保证信息安全的前提下与电力公司后台系统通信，甚至智能装置彼此之间能够相互通信。

3）利用高级分析工具，对来自智能装置以及其他数据源的原始数据进行数据融合与变换，形成有用的信息。

4）商务智能与优化工具既可以自动地又可以在人工参与的情况下提供高级的决策支持。

智慧电网的数据库与系统架构由 5 个主要部分组成，分别为数据源、数据传输、数据集成、分析、优化。除此之外，还包含用于数据分发的一系列手段，如发布-订阅中间件、数据门户以及基于 Web 的服务[8]。

思科（CISCO）公司对智能电网的贡献在于提出了一个 IP 架构。思科公司将智能电网描述为与电网紧密集成的数据通信网络，这个集成的网络能以准实时的方式采集并分析与电力输、配、用相关的数据。基于这些数据进行预测，将预测结果和决策支持信息提供给各利益相关方，辅助其进行电力管理。发、输、配、用各部分的紧密集成是该架构的关键特征。

事实上，智能电网尚无一个广为接受的或者普适的定义，已有定义都是针对特定领域和场合。下面我们试图针对利益相关方和开发人员，给出智能电网的一个工作定义。

1.11 基于性能评价的智能电网工作定义

智能电网的工作定义[㊀]中应包含如下要素：

1）能够实时评估电网的健康状态。

2）能进行预测分析并执行预防性控制。

3）能够兼容分布式能源和可再生能源等新资源。

4）能够处理随机性需求，并能对智能家电做出反应。

5）能够提供自愈、重构和故障恢复等功能。

6）能够实时处理负荷与市场成员的随机性。

7）能够通过智能设备、通信协议与标准以及智能算法形成更为复杂的交互行为，以改善智能通信与交通系统。

在智能电网环境下，利用智能控制策略处理电网阻塞、失稳或可靠性问题。智能电网将能够保障信息安全，具有很强的适应能力，能可靠地抵御大扰动的冲击。智能电网还将具备其他一些特性，例如，能够接入可再生和分布式能源，可以与可再生能源、插电式混合动力汽车（Plug-in Hybrid Electric Vehicle，PHEV）进行双向信息交换等。此外，新型接口技术可以为制造业和服务业的投资者、企业家提供数据流模式和信息。

综合以上分析，本书给出如下的智能电网工作定义：

“一个高级、数字化、具有双向潮流的电力系统。能对各种不确定性进行预测，具有自愈、自适应、弹性和可再生性。兼容于现有和未来的组件、设备、系统标准并支持互操作性。能够保障信息安全，抵御恶意攻击。”

为实现上述定义中描述的特性，智能电网需要更为鲁棒、经济的实时测量技术和更为先进的通信技术，以完成数据与信息的传输；根据上述定义，智能电网将允许接入智能家电，支持部署电动汽车和混合动力汽车等高级储能装置，支持多种储能控制策略，支持需求侧管理和各种需求响应方案。

1.12 典型架构

参与智能电网开发的各个机构提出了多种智能电网架构方案。本书介绍其中两种。第一种来自美国能源部，如图 1.5 所示。在此架构中，美国能源部将智能电网分为 9 大区域，分别为输电自动化、系统协同与态势评估、系统运行调度、配网自

㊀ 工作定义是指共同工作的人士能够理解并接受的定义。它不要求获得任何标准机构的认可，其目的是使同行们有了共同认识和共同语言，从而获得研究工作上的方便和效率。工作定义的另一个意义在于，它有助于促进和完善未来的正式定义的制定。——译者注

动化、可再生能源接入、能源效率、分布式发电与储能、需求参与信号和方案以及智能家电、PHEV 和储能。

图 1.6 展示了第二种架构。在这个技术框架中，未来的智慧电网分为若干子系统，并包含智能、技术、新型工具以及创新等几个层次。此架构中包含了电力系统的大型发电、输电、配电、终端用户等诸多环节。下一节将介绍各环节中重要组件的功能。

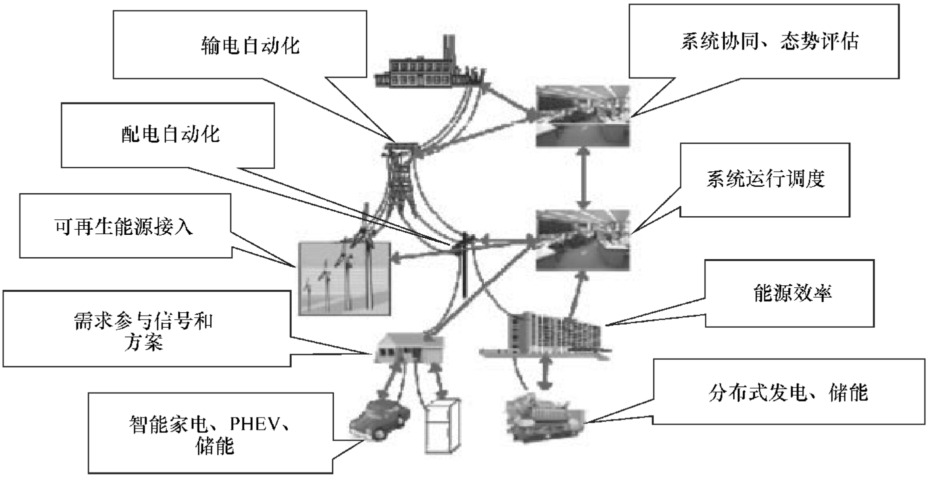


图 1.5　美国能源部关于智能电网设计的典型架构（架构 1）

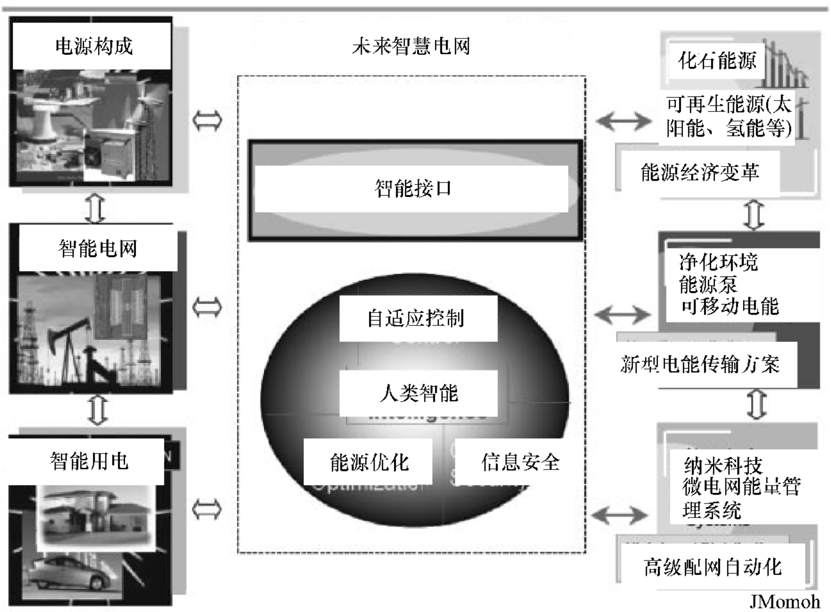


图 1.6　智慧电网（架构 2）

1.13 智能电网各构成组件的功能

在电力系统的发电层面，智能化的提升将从提高发电的稳定性与可靠性方面，扩展到智能控制以及含可再生能源的电源构成等方面。

1.13.1 智能设备接口组件

智能监控设备是发电单元实时信息处理的组成部分。无论在集总分配式还是区域式能源系统中，都需要在系统运行中无缝地集成这些监控设备。

1.13.2 储能组件

为了解决可再生能源固有的波动性问题、减少用电高峰时电能供需之间的缺口，希望能对电能进行存储以达到平滑出力或者移峰的目的。储能因此成为一项非常重要的技术。现有的能量存储技术包括抽水蓄能、先进电池、液流电池、压缩空气、超导储能、超级电容器以及飞轮等。

在智能电网发电层面设计之初，就应引入一些相关的市场机制以处理可再生能源、分布式发电、环境污染等问题。

1.13.3 输电子系统组件

输电系统用于连接各个重要的变电站和负荷中心，它是整个互联电力系统的主干。以较为低廉的价格实现电能的高效与可靠传输一直是输电系统规划和运行人员的最终目标。输电网络必须能够承受负荷的动态变化和抵御各种事故以保持电能的不间断传输。为确保输电系统的性能、可靠性以及供电质量，制定了各种电力安全事故处置规范。为了在输电层面达到智能电网所期望的性能指标，需要开发智能的性能评估技术和分析工具，如动态最优潮流、鲁棒状态估计、实时稳定性评估、可靠性分析以及市场仿真工具等。为了使输电子系统具备智能性，实现所谓的“智能输电”，需要基于 PMU、状态估计以及通信技术对电网进行实时监视。

1.13.4 监视与控制技术组件

智能输电系统包括一个具有自我监视和自愈能力的智能网络，具有自适应性和预测性，使得发电侧和需求侧具有足够的鲁棒性，能够应对电网运行中出现的阻塞、失稳以及可靠性等问题。当遭受大的扰动时，未来的电网应表现出足够的弹性，能够利用实时、自适应控制实现系统的可靠恢复。

1.13.5 智能配电网子系统组件

配电网是完成电能向终端用户输送的最后一个环节。在配电网电压等级中，由主干馈线对小型工业用户供电，由次级配电线路对居民和商业用户供电。高级配电自动化系统需要一系列的技术支撑，如智能电表、用户和电力公司之间的通信连接、能量管理以及高级计量体系等。它应该包括故障检测、电压优化与负荷转移、自动计费、网络重构与自动恢复以及实时电价等模块，并具有自学习能力。

1.13.6　需求侧管理组件

通过实施需求侧管理项目和能效项目，可以改变用户用电方式、减少高耗能机组的运行费用、推迟电源建设。

需求侧管理项目可以达到节能减排、减少用电支出、提高发电可靠性等目的。这些项目的综合效用将会改善电力公司的负荷曲线。为了实施这些项目，需要制定标准协议、建设具备双向通信能力的信息高速公路。另外，诸如即插即用、智能楼宇、智能家居、各种需求侧仪表、清洁空气法规、用户端能效优化接口等要素也必须各就其位。

1.14　小结

本章讨论了智能电网设计与发展过程中各利益相关方的职能及其取得的进展，给出了智能电网的工作定义，展示了智能电网的两种设计架构，讨论了未来智能电网的主要构成组件和功能。下一章将讨论智能电网分析与开发中所需要的工具和技术。

参 考 文 献

[1] "The Smart Grid: An Introduction and Smart Grid System Report." Litos Strategic Communication, U.S. Department of Energy, 2009.

[2] L.D. Kinter-Meyer, M.C. Chassin, D.P. Kannberg, et al. "GridWiseTM: The Benefits of a Transformed Energy System." Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-14396, 2003.

[3] "Overview of the Smart Grid: Policies, Initiatives and Needs." ISO New England, 2009.

[4] "The Modern Grid Initiative." GridWise Architecture Council, Pacific Northwest National Laboratory, 2008.

[5] "Our Blueprint for the Future." PEPCO Holdings, 2009.

[6] "PSERC Overview, 2008." PSERC, 2008.

[7] J. Taft. "The Intelligent Power Grid." *IBM Global Services*, 2006.

[8] "A National Vision for Electricity's Second 100 Years." Office of Electric Transmission and Distribution, U.S. Department of Energy, 2003.

推 荐 阅 读

American Recovery and Reinvestment Act of 2009. Public Law No. 111-5, 2009.

P. Van Doren and J. Taylor. "Rethinking Electricity Restructuring." *Policy Analysis* 2004, 530, 1–8.

EPRI Intelligrid. Electric Power Research Institute, 2001–2010.

"Smart Grid System Report." U.S. Department of Energy, 2009.

The Energy Independence and Security Act of 2007. S. 1419, 90d Congress, 2007.

"The Smart Grid: An Introduction and Smart Grid System Report." U.S. Department of Energy, 2009.

第 2 章　智能电网通信与测量技术

2.1　通信与测量

美国的输配电系统目前仍在使用相对落后的通信和控制技术。先进的配电自动化装备如 RTU 设备[3] 和 SCADA 系统已经在研发中了，新一代信息通信系统将实现电网与千家万户的智能家电进行通信[1]。最终，高速、高度集成、双向的通信技术将把智能电网构建成为一个动态、互动、规模巨大的可以进行实时通信和电力交换的电网。

实时的测量、监视和控制技术在未来智能电网中将扮演极为重要的角色。标准、信息安全、互操作等问题都与通信密切相关，这些问题将在第 8 章展开讨论。在设计通信方案时，需要考虑重要信息和高敏感信息的安全传输问题，这些则离不开标准体系的制定。

应该说，现有的测量、监视和控制技术都将在未来智能电网中继续发挥作用，但需在标准制定、信息安全、互操作等方面继续加强研究。尤其是，未来的系统将基于开放架构、具备即插即用能力，那么，需要为智能传感和控制设备、控制中心、保护系统、用户提供一个安全、可信的通信网络。这样的通信网络既可以是有线的，也可以是无线的，比如：

1）多协议标签交换（Multi-Protocol Label Switching，MPLS）：是一种在网络节点之间利用标签引导数据高效传输的远程通信技术。

2）全球微波互联接入（Worldwide Interoperability for Microwave Access，WiMAX）：是一种利用互联网技术的点到多点远程无线数据通信技术。

3）宽带电力线载波（Broadband over Power Lines，BPL）：利用电力线实现互联网通信。

4）Wi-Fi：是一种广泛采用的无线局域网技术。

5）其他技术，如光纤通信、网格（mesh）通信、多点扩频（Multipoint Spread Spectrum）通信等。

智能电网通信技术应具备如下 5 个特征：

1）高带宽。

2）基于 IP 的数据通信（宜支持 IPv6）。

3）数据加密。

4）信息安全。

5）支持服务质量（QoS）和 IP 电话（VoIP）。

为实现软硬件之间的可靠互联，应根据不同的应用场合选择不同的网络拓扑结构。以下为常用的网络拓扑。

局域网（Local Area Network，LAN）[5,6]由至少两台计算机和大容量存储设备（文件服务器）组成，同一局域网内的计算机采用相同的通信协议彼此访问。局域网配有网络操作系统，实现数据帧的接收和网络设备的管理与控制，并实现用户之间通信。局域网中的每个硬件（如计算机、打印机）称为一个节点，同一局域网中可包含数百个节点。局域网分布在有限的地理范围内，一般不超过 10km。地理范围受限带来的一个好处是，局域网可以拥有很高的通信带宽。局域网之间可以彼此互联，还可以接入广域网。如果需要互联的局域网具有相似的体系结构，那么中间可以采用网桥，网桥的作用就像一个转运点；否则，就需要利用网关完成协议转换，实现异构系统之间的互联。

局域网是一种共享访问技术，即所有互联设备共享同一种通信介质，如同轴电缆、双绞线、光纤等。这些设备还需通过网络接口卡（NIC）才能接入通信网。网管软件负责对各种网络资源进行监视和管理。

局域网具有如下特性和优点：

1）资源共享：同一局域网内的计算机可以共享存储设备、程序、数据文件等资源。例如，多个用户可以使用同一台打印机、共享同一个数据库和软件。

2）局域性：顾名思义，局域网是一种局限在较小地理区域内的计算机网络，其覆盖范围通常是办公大楼、公共设施、校园等。

3）成本和可用性：局域网相关的应用软件和接口设备都已成熟且价廉。

4）高速通信：数据传输速率可达到 1～10Mbit/s㊀。

5）灵活性：易于扩展、易于运行维护。

局域网有三种数据传输方式：

1）单播传输：单个数据包仅被发送到网络中单个目标节点（地址）。

2）组播传输：单个数据包被复制并发送到网络中的一组目标节点，由源节点为数据包指定组播地址。

3）广播传输：单个数据包被复制并发送到网络中的所有目标节点，由源节点为数据包指定广播地址。

局域网拓扑是指用传输介质连接各种设备所采用的物理布局。最常用的网络拓扑有如下 4 种：

1）总线拓扑：网络中各节点（工作站、服务器等）连接到同一线型公共总线上，数据从源节点发出后沿总线扩散，总线上其他节点都可以接收到数据。

㊀ 现代局域网的传输速率已普通达到或超过 100Mbit/s。——译者注

2）环形拓扑：网络中各节点首尾相连形成一个闭合的环路，数据在环路中沿着单方向在各节点间传输。

3）星形拓扑：网络中以集线器或交换机作为中央节点，其他节点皆与中央节点直接相连。

4）树形拓扑：和总线拓扑类似，只不过分支链路中也允许接入通信节点。

局域网中的设备和软件皆采用相同的标准协议，常用的有以太网标准 IEEE 802.3、令牌环标准 IEEE 802.5 或 IEEE 880.2。上述标准可从 IEEE 出版社购买。

用户户内网（Home Access Network，HAN）[2,3] 是一种空间上局限于单个家庭用户的局域网。HAN 支持对户内数字设备和家电的远程遥控。智能电表、智能家电、基于 Web 监视器等都可以采用这种网络。

邻近网络（Neighborhood Area Network，NAN）是一种无线社区网络，目前用于无线本地应用。理想情况下，NAN 的覆盖区域将超过局域网。

在设计智能电网通信系统架构时，要充分重视各领域之间的信息集成和互操作问题。这里的领域是由具有相似通信特点和通信需求的系统、建筑物、个体或设备组成。在 NIST 提出的智能电网概念模型中，将智能电网分为 7 个领域㊀，各领域简述如下：

1）大规模发电：包括市场服务接口、发电厂控制系统和发电机组。本领域通过广域网、变电站局域网和互联网与电力市场、运行、输电等领域交互。

2）输电：包括变电站设备与控制器、数据集中器以及储能等。本领域通过广域网、变电站局域网与发电和运行领域交互，并和配电领域紧密集成。

3）配电：本领域通过现场局域网和运行、用户领域交互。

4）用户：包括用户端设备、计量系统、各种用户端 EMS、储能、家电、PHEV 等。本领域一般采用 HAN 和局域网等通信手段。

5）服务提供商：包括提供计费等用户服务的公用事业公司和第三方服务商。本领域主要利用互联网与运行、用户等领域交互。

6）运行：包括 EMS、广域测量系统（WAMS）㊁、SCADA 等系统。本领域又可进一步划分为独立调度机构（Independent System Operator，ISO）、区域输电组织（Regional Transmission Organization，RTO）、输电、配电等子领域。

7）电力市场：包括 ISO、RTO、集总代理以及其他各种市场参与方。

2.2 监视、PMU、智能电表与测量技术

电力系统中的传感、计量和测量系统为电网监视和电力市场运行提供了必需的

㊀ 见“NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards”。——译者注

㊁ 原文为 Web Access Management System（WAMS）。依据上下文，应为 Wide Area Measurement System（WAMS）。——译者注

数据，在智能电网环境下，需对这些系统从电网的各个层面进行全面升级。其中，大量部署的传感器除了提供电网监视功能外，还具有如下应用：故障停电检测和处理，设备健康状况和电网完整性评估，杜绝因估计抄表导致的误差，提供防窃电保护，为电力用户实施需求侧管理提供支撑等。

而在计量和测量方面，新的数字化技术将采用双向通信，多种输入（如电价信号、分时电价、RTO减缓电网阻塞[7]），多种输出（如实时用电数据、电能质量、电气参数），并网与孤岛运行能力，与发电机组、电网运行人员以及用户门户的接口来增强电力测量。这大大增强了数字技术在计量和测量中的应用，推进了用户端电表技术的发展，促进了WAMS的部署，实现了先进的电网监视与保护功能[11,12]。下面各节对这些测量技术做详细说明。

2.2.1　广域测量系统（WAMS）

电力公司设计WAMS的目的是为了优化电网容量和防止扰动范围的扩大。利用WAMS所提供的实时信息，可以进行系统安全稳定运行边界的辨识，对动态扰动进行早期预警，从而防止或减轻大停电事故的发生。WAMS依赖于安装在电网中的大量传感器，这些传感器利用卫星导航系统（如GPS）获得精确的时间同步信号，并利用通信网络传输测量信息。现有的技术都是利用传感器采集同步相量信息，相量测量单元已被绝大多数智能电网系统所采用。

2.2.2　相量测量单元（PMU）

PMU（或称同步PMU）就像一个照相机，能够给电力系统拍个快照、打上时间标签后发送给运行人员。PMU主要采集母线的电压相量和支路的电流相量，另外还能采集位置信息和其他电网运行参数[9,10]。分布在电网各处的PMU能进行高精度、同步的信息采集，使得运行人员可以得到全网关键节点的功角信息并进行可视化。PMU利用GPS接收器得到高精度同步时钟信号[12]。除了专用PMU装置外，其他智能电子装置（如微机保护、故障录波器）中也可以集成相量测量功能。IEEE主持制定了同步相量标准，用以规范从PMU到主站（Phasor Data Concentrator）的信息传输规约。图2.1给出了PMU测量系统的示意图[9]。

为了确保测量精度，PMU内部采样频率可高达1.4MHz[3]，装置每周波可进行48次电压、电流的相量计算，并可完成12次有功功率、无功功率、频率和相角计算。这样，就有条件对电压稳定问题实施在线识别和快速控制，以尽可能减少因电压崩溃而导致的损失[8]。经过多年的研究和工程应用，PMU已被证实能在电压稳定的监视与控制中发挥作用[6-9]。

相量测量系统能够提高广域状态感知能力，从而可以缓解电网阻塞现象，减少甚至防止大停电事故的发生。智能电网可以为相量测量技术提供高级的信息通信技术，从而提高电力系统在实时、动态条件下的可观性。而可观性的提高，又将反过来全面提升智能电网的发、输、配、用各个环节。尤其是，这将促进电网吸纳越来

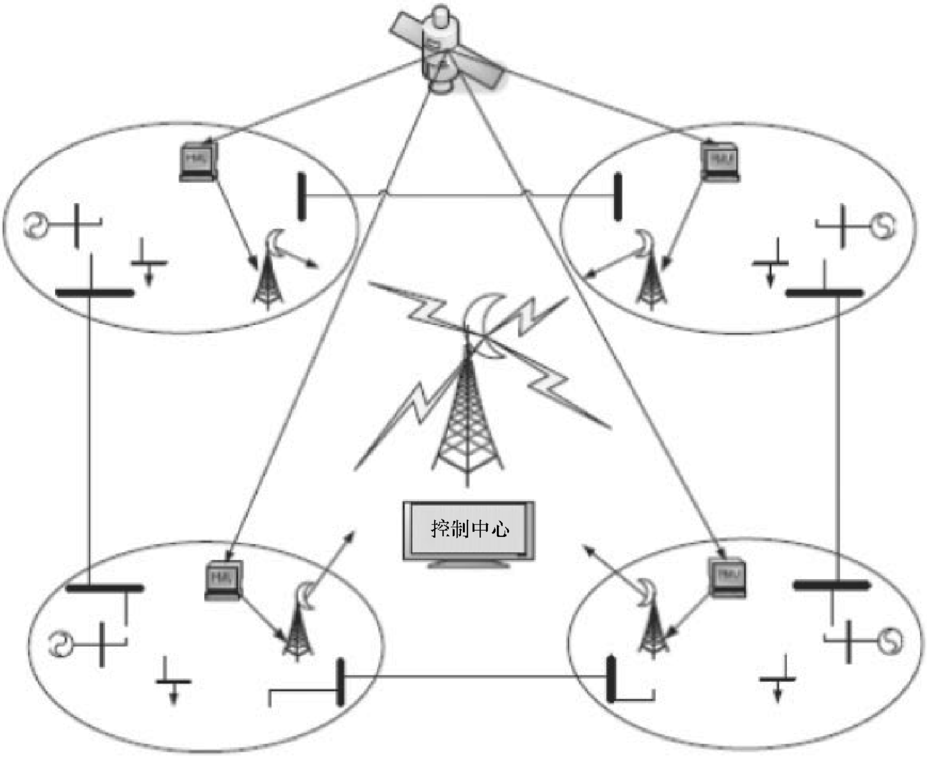


图 2.1 同步相量测量系统概念示意图[9]

越多的分布式发电，使得电源越来越靠近用户，实现能源的高效利用。

除了以上讨论的相量测量系统，电力公司还安装了其他监测装置或系统，例如输电线路动态增容、各种导线传感器、绝缘子污秽放电监测、射频识别、电子式互感器，另外还有针对断路器、电缆、电池、温度、电流频率的在线监视系统等[10,11]。研究这些技术并将其应用到智能电网中是一项重要且持续性的工作。

2.2.3 智能电表

智能电表有两项功能：一是向用户提供电量计费信息，以帮助用户控制用电成本和电量消耗；二是向电力公司发送负荷数据，利用这些数据，电力公司可以控制负荷率、统计尖峰负荷需求、制定电价策略。将智能电表和双向通信技术相结合还可以实现自动抄表系统。除了电网领域，在供水、燃气领域也在计划采用智能表计系统[9]。

有了智能电表，用户可以获得更为详细和透明的账单，清楚知道每千瓦时的电费，获知自己的用电习惯，并通过主动改变用电习惯从而减少电费支出；而对电力公司而言，可以实现更快的故障停电监测和供电恢复。在需求响应方面，许多需求

响应项目的实施都以智能电表为基础，如各种激励费率和电价方案、税收抵免、用户志愿降载以获得经济补偿等。此外，智能电表还能用于远方断开/接入用户、电器监视与控制、智能温度调节、预付费电能计量、设备开关操作，以及增强电网监视等。

在政府的支持下，全美已开始大规模部署智能电表。学术界积极开展高级计量技术和软件的研发，以期提高现有电网分析、电压稳定和系统安全评估的水平。

2.2.4　智能家电

智能家电能够响应电力公司的激励或控制信号实现循环打开与关断。有了智能家电，用户可以志愿参与需求响应项目，在用电高峰或电网稳定受到威胁时志愿降载，从而获得经济补偿。为此，智能家电的一项基本功能是允许用户通过互联网对其实施远程控制。

在电力总需求中，空调、取暖器、热水器、电冰箱、洗衣机、烘干机等电网友好型电器（GFA）占据了大约20%[10]。GFA内置小型芯片，能够实时跟踪电网频率的变化，一旦监测到电网频率低于预定值，则自动与电网断开几分钟时间。当电网中存在大量GFA时，就可以帮助电网从危机状态中恢复稳定。

2.2.5　高级量测体系（AMI）

作为智能电网的基础性功能模块，AMI的实施需要电网、通信网以及相关信息系统等基础设施的有效融合。AMI的各项功能对通信网络有极强的依赖，但在AMI所涉及的多个子系统中（如智能电表、用户户内网、计量数据管理、高级配电管理等），尚缺乏一套完整的信息安全规范和实施导则。作为解决这个问题的第一步，需要对AMI的信息安全问题进行需求分析㊀。这些问题对电力工业而言大多为新问题，好在传统电力系统中也存在类似的依赖于高可靠通信基础设施的大规模应用，其实施经验可供AMI借鉴。另外，在国防、有线电视、电信等工业领域也有大量现成的规范、标准和最佳实践，可供AMI直接采用。

AMI功能主要有如下三类：

1）电力市场应用：帮助减少乃至消除由抄表和维护所产生的人员、交通和基础设施支出，提高计费精度，在减少坏账的同时，提供基于时间的电价方案；为能量管理提供准确的用电数据。

2）用户端应用：在负荷减载、减少坏账、改善现金流等方面有助于增加用户感知度，提高用户用电的便利性和满意度；支持需求响应和负荷管理，提高系统稳定性和运行效率。

㊀ 美国能源部为此成立了专门委员会，并形成技术报告：AMI System Security Requirements，见http：//energy．gov。——译者注

3）配电网运行：基于 AMI 采集的数据优化电网；通过优化配电网结构和实施分布式发电管理，支持故障定位和恢复，来提高事故处理效率、减少停电时间；提高用电满意度，降低线损；支持紧急情况下的需求响应（如消减用户负荷）。

今后，智能电表还将记录用户燃气和自来水的使用情况，这样，AMI 的应用领域将不再局限于电网。AMI 的另一个值得关注的问题是网络和数据安全，将在第 8 章介绍。

2.3 GIS 与谷歌地图工具

在传统电网的输配电网络和远程通信网管理中，GIS 就已得到了应用。利用其提供的数据收集和运行维护功能，GIS 还有助于电力公司的资产信息管理。

谷歌地球（Google Earth）是谷歌公司开发的免费软件，该软件提供了一个用户友好且仍在不断完善的平台，允许用户获取地理上下文信息并进行探究式研究与分析。利用锁孔标记语言（Keyhole Markup Language，KML），用户可以在地图上叠加图像、点、线、多边形等基本图元[7]，创建出可以动态更新的地理信息并共享到互联网上。通过卫星图像，谷歌地图的分辨率可精细至街道。将 GIS 与谷歌地图（或其他地图）结合起来，可以更好地建立输电网络与其周边环境的关系，这对电网优化规划很有意义，例如，合理规划输电线路走廊，优化传感器和线路杆塔的布局等。利用 GIS 的地图信息对传感器采集的实时信息进行可视化显示，有助于快速锁定故障位置、制定最佳抢修路径并实现快速故障恢复，从而减少停电时间和设备损坏。

根据电力系统发展趋势以及未来的需求，GIS 应在以下方面发挥作用：

1）减少停电时间。

2）防止电力设施被盗，避免由此导致的难以估量的损失。

3）提高抄表和计费系统的效率。

4）拓展用户服务的项目。

5）提高资产管理的水平。

6）提高配电网可靠性指标，如系统平均停电时间指标（System Average Interruption Duration Index，SAIDI）和系统平均停电频率指标（System Average Interruption Frequency Index，SAIFI）。

7）改进用户投诉记录的分析手段。

8）针对已有和假想的问题，加强电能质量分析和事故研究。

9）合理安排诸如切负荷和植被控制㊀等任务计划。

㊀ 植被控制的目的是防止输电线路周围林木过于旺盛而发生线路触树故障。——译者注

2.4　多代理系统（MAS）技术

MAS 是由多个代理构成的分布式计算系统，代理之间通过协作共同完成特定的任务。MAS 的性能主要取决于代理之间的协同性（协商、合作能力），多个代理所表现出来的群体能力超过单个代理能力的简单相加。

在分布式系统应用中，MAS 愈来愈受到重视。在智能电网环境下，引入 MAS 架构可以改善电网监测系统的开发方案（见图 2.2）。例如，在某个故障监测与诊断系统中采用了 MAS 架构，系统包含一系列代理，如仲裁代理（Arbitrator Agent，AA）、系统监视代理（System Monitoring Agent，SMA）、故障检测代理（Fault Detection Agent，FDA）、诊断代理（Diagnosis Agent，DA）、评判指标计算代理（Judgment Index Agent，JIA）以及调度代理（Scheduling Agent，SA）。代理之间利用通信交换信息，接受任务指派和反馈任务执行的信息，通过对系统的持续监视，实现对系统运行状况的实时管理。

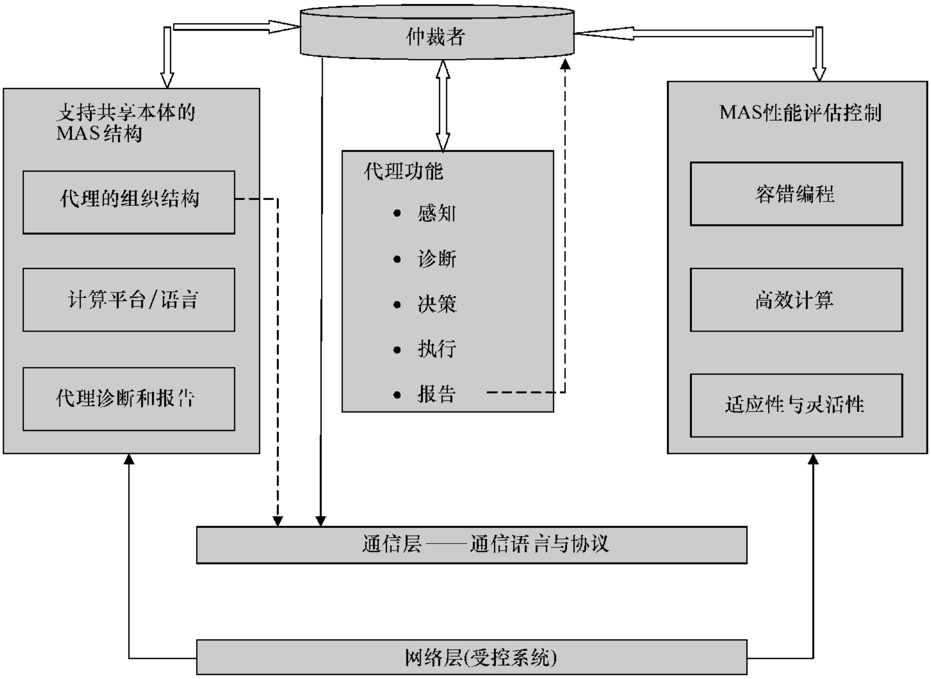


图 2.2　多代理架构简示

2.4.1　用于智能电网的多代理系统

如第 1 章所述，美国能源部在其发起的“现代电网倡议”（Modern Grid Initia-

tive)[1]中，认为电网的智能化应从输、配电两个层面，将高级传感器技术、先进控制方法、集成通信技术集成到现有电网中。智能电网应具有如下关键特征：

1）自愈。

2）用户友好，鼓励用户参与电网互动。

3）抵御攻击。

4）满足面向21世纪的电能质量要求。

5）能够接纳所有的发电和储能类型。

6）使市场化成为可能。

7）优化资产，提高运行效率。

对于任何电力运行监控系统，控制系统的架构都是核心问题，而这其中，又需重点考虑采用何种软硬件协议以实现状态和控制信息的传输。在常规电力系统中，上述信息的传输是由SCADA[4,5]系统完成的。目前，电网运行监控系统的架构正在向MAS架构发展。在MAS中，多个代理协同工作完成赋予的任务，实现单个代理所无法完成的系统目标。代理具有自治性、社会性、反应性和主动性[6]，这使得MAS成为处理复杂系统的强大技术手段。

MAS的自治性表现在其无须人工干预的情况下自主地完成指定的任务，其社会性表现在代理之间可以利用代理通信语言进行协商。MAS的反应性指其具备感知所处环境并做出适当反应的能力。最后，MAS的主动性体现为能遵循承诺采取主动行动，不断自我评价并逐步导向目标。

2.4.2　多代理系统示例

本节介绍智能分布自治电力系统（Intelligent Distributed Autonomous Power System，IDAPS㊀）MAS，重点介绍该系统中的控制代理、分布式能源代理、用户代理和数据库代理。

1）控制代理。其职责包括：监测系统电压与频率，识别电网扰动或故障状态。当检测到上游电网发生故障时，向主断路器发送跳闸命令，将IDAPS微网从公共电网隔离出来；从主电网接收电价（$/kWh）信号（可取自AMI），并发布到IDAPS内部。

2）分布式能源代理。其职责包括：保存分布式能源的属性信息，监控分布式能源的出力和运行状态（并网/脱网）。分布式能源的属性包括分布式能源识别符、类型（如太阳电池、微型燃气轮机、燃料电池等）、额定出力（kW）、本地剩余燃料、成本函数或用户同意向公网售电的价格点、分布式能源可用时间段（根据预定的检修计划表）。

㊀ 由美国弗吉尼亚理工大学（Virginia Polytechnic Institute and State University）提出的一种智能微电网架构。——译者注

3）用户代理。起到用户网关的作用，用户通过该代理访问IDAPS微网。其职责包括：向用户提供IDAPS内所有实体（如分布式能源、负荷等）的实时信息；监视各重要负荷和非重要负荷的用电情况；根据用户预设的优先级控制负荷投切状态。

4）数据库代理：为其他代理、其他用户提供公共的数据访问点。其职责包括：存储系统信息，记录代理间共享的消息和数据。

2.4.3　多代理技术

MAS中的代理可定义为包含某个特定领域有用属性的实体。按照这个定义，代理可视为一个信息处理单元，根据所掌握的信息自主执行特定的任务。代理具有如下基本属性：

1）自治性：目标导向，主动性，自启动行为。

2）协作性：能与其他代理合作，共同完成一个公共的目标。

3）知识层面的通信能力：代理之间彼此通信的语言具有一定的拟人性，而不是一般系统中程序与程序之间通过协议的通信方式。

4）反应性：能有选择性地进行感知和行动。

5）时间持续性：能在很长一段时间内保持识别和状态的持久性。

MAS具有如下特点：

1）单个代理不具备完整的问题求解能力。

2）不存在全局的系统控制。

3）分布式数据。

4）异步计算。

下面举一个MAS技术应用于船舶电力系统的实例[㊀]。船舶故障既可能由内部故障引起，也可能由外部事故引起（如战争）。为使船舶获得最佳性能，需尽可能恢复船舶供电系统。当船舶电力系统发生故障时，保护系统将尽快隔离故障。随后，MAS系统将通过多个代理之间的协商与协作完成船上配电网络的重构。

2.5　微电网与智能电网的比较

随着对微电网和智能电网研究的深入，两者的区别不断明晰。简单地说，微电网是靠近负荷的小型电力系统，可以运行于孤岛和并网两种模式。微电网内部主要由燃气轮机或可再生能源提供能量，由专用电力电子器件完成能量转换。微电网与大电网有唯一连接点，并具备即插即用特性。微电网需要使用专门的滤波器来抑制

㊀ 进一步内容可参阅如下论文：JA Momoh，“A Multi-Agent Based Restoration Approach for NAVY Ship Power System”。——译者注

谐波，以改善电能质量和运行效率。大学和政府机构已开展了多个微电网示范工程，并建成了试验平台。概括起来，微电网可视为一个本地的、集中的电力系统，具有有限的高级控制功能；而智能电网是一个广域的、分布的电力系统，具有复杂的自动控制和决策支持能力。

2.6 小结

本章主要讨论了智能电网中的通信技术。对于测量技术，主要介绍了 PMU 和智能电表。本章将 GIS 视为一种重要的规划工具，可用于重要设备的优化布局。本章最后还讨论了 MAS 在智能电网中的应用。

参 考 文 献

[1] V. Skendzic and R. Moore, "Extending the substation LAN beyond substation boundaries: current capabilities and potential new protection applications of wide area Ethernet," in 8th Annual Western Power Delivery Automation Conference, Spokane, WA, A pril 10-13, 2006. Available: http://www.selinc.com.

[2] A. Guzman, D. Tziouvaras, E. O. Schweitzer, III, and K. E. Martin, "Local and wide area network protection systems improve power system reliability," in 31st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 19-21, 2004. Available: http://www.selinc.com.

[3] Communication Networks and Systems in Substations – Part 1: Introduction and Overview, IEC Standard 61850-8-1, 2004.

[4] M. Donolo, "Advantages of synchrophasor measurements over SCADA measurements for power system state estimation," Application Note AN2006-10, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2006. Available: http://www.selinc.com/appnotes.htm.

[5] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Virtual Bridged Local Area Networks, IEEE Standard 802.1Q, 2005.

[6] IEEE Standard for Local and Metropolitan Networks – Media Access Control (MAC) Bridges, IEEE Standard 802.1D, 2004.

[7] Federal Energy Regulatory Commission, Docket No. RM99-2-000: Regional Transmission Organizations, Order No. 2000, FINAL RULE, December 20, 1999.

[8] E. O. Schweitzer, III and D. E. Whitehead, "Real-time power system control using synchrophasors," in 34th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 16-18, 2007. Available: http://www.selinc.com.

[9] G. Benmouyal, E. O. Schweitzer, III, and A. Guzman, "Synchronized phasor measurement in protective relays for protection, control, and analysis of electric power systems," in 29th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 22-24, 2002. Available: http://www.selinc.com.

[10] B. McDermott, D. J. Dolezilek, and T. P. Tibbals, "Proven drop-in control house turnkey solution for total protection, monitoring, automation, and control of T&D substations – a case study in justification and implementation," in 5th Annual Western Power Delivery Automation Conference, Spokane, WA, April 1-3, 2003. Available: http://www.selinc.com.

[11] G. W. Scheer and D. J. Dolezilek, "Comparing the reliability of Ethernet network topologies in substation control and monitoring networks," in 2nd Annual Western Power Delivery Automation Conference, Spokane, WA, April 5-7, 2000. Available: http://www.selinc.com.

[12] D. J. Dolezilek and D. A. Klas, "Using information from relays to improve protection," in 25th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 13-15, 1998. Available: http://www.selinc.com.

[13] Communication Networks and Systems in Substations – Part 8-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3, IEC Standard 61850-8-1, 2004.

第 3 章　用于智能电网设计的性能分析工具

3.1　潮流计算研究概述

潮流计算分析在电力系统规划和运行中起到关键的作用。例如，电力系统规划人员需要根据峰值负荷下的潮流计算结果对导线、变压器、电抗器、并联电容器组等元器件进行选型。同时这些数据也可为新建电厂、供电走廊的选址提供依据，使之与周边系统互联后能够满足北美电力可靠性协会（North American Electric Reliability Corporation，NERC）对系统可靠性的要求。通过潮流分析可以判断线路负荷及母线电压是否存在越限，并发现诸如变压器过载、节点相角过大、发电厂无功功率接近极限等对电力系统稳定性产生严重影响的情况。

平均负荷与非尖峰负荷情况下的潮流分析也十分有用，例如，在非尖峰负荷情况下可能会发生尖峰负荷时所不易出现的系统过电压。此外，潮流计算还能够帮助调度人员对机组进行经济调度，进行紧急情况下的预想事故分析[7]，以及协调各区域电网运行。通常，潮流计算用于在某种给定状况下对电力系统的性能及运行进行评估。

3.2　智能电网中潮流计算的挑战以及现有方法的不足

目前传统的潮流计算方法存在缺点，将其用于分析智能电网的性能及运行前需要解决这些不足。首先考虑如下 4 个基本问题：

1）与传统电力系统相比，智能电网有何特殊之处？

2）智能电网需要进行哪些分析计算？

3）在潮流计算方面有哪些新的发展方向？

4）新的潮流计算方法需具备哪些特点以适应于智能电网性能评估的要求？

表 3.1 比较了现有的与期望的潮流计算方法的异同。

表 3.1　潮流计算方法比较

现有潮流计算方法	期望的潮流计算方法
集中式发电与控制	集中与分布式相结合的发电与控制，分布式智能
基于基尔霍夫定律的潮流计算	含大量电力电子器件的潮流计算
以负荷需求确定发电计划	含有可控发电及各种波动性、随机性能源，动态负荷平衡[1,6]
人工倒闸操作和故障响应	自动响应及故障预防
系统仿真及响应跟踪	监测过负荷以防止阻塞

在开发新一代潮流计算方法时还需考虑如下特点：

1）能够适用于含可再生能源发电的输配电系统[9-11]。

2）具有自适应能力以保证系统的协调运行。

3）需要智能分析工具以处理具有随机性与不确定性的高阻抗联系的配电网。

4）考虑到功率的双向流动性，有必要在电力电子器件中使用FACTs装置。

现有的大多数潮流计算工具只能在离线情况下计算电压幅值、相角、潮流、功率等参数并完成调度计划，仅小部分支持实时计算。为增强潮流计算能力，智能电网潮流计算过程将包括以下步骤：

1）获取辐射型或环形电网的系统参数。

2）存在数据传输通道以保证在线网络求解的可行性。

3）用节点导纳矩阵来表示所研究系统的互联关系，并确定初始条件。

4）求解并评估节点有功和无功功率误差，当功率误差越限时，需调整初始条件。

5）根据当前的有功、无功功率需求，确定合适的静态电压矢量，使节点功率误差达到最小。

上述过程需多次迭代直到满足收敛条件，此时程序最终计算出电压幅值、相角、潮流、网损等潮流数据，并输出各节点的功率误差。

3.3　潮流计算研究现状：经典与扩展的方程与算法

潮流计算首先需对电力系统建模，通常以母线为节点、以输电线路为边建立电网模型，电压源和负荷皆接到母线上，母线上还可接入电感、并联电容等元件。

传统潮流计算方法主要有以下三种：

1）高斯-赛德尔（Gauss-Seidal）方法。

2）牛顿-拉夫逊（Newton-Raphson）方法。

3）快速解耦方法。

下面分别作简要介绍。

3.3.1　高斯-赛德尔方法

基于基尔霍夫电流定律列写节点电流方程，设$I_{\text{injection}}$表示节点注入电流，则

$$I_{\text{inj}(j)} = \sum_{i=1}^{n} I_{ji}$$

式中，$I_{\text{inj}(j)}$为节点j的注入电流；I_{ji}为节点j流向节点i的电流。节点注入电流列矢量还可以表示为节点导纳矩阵Y_{bus}与节点电压列矢量V_{bus}的乘积。

节点注入功率可采用如下非线性方程表示，其中电源和负荷的功率皆用复功率表示：

$$S_{\text{inj}-k}=P_{\text{g}}+\text{j}Q_{\text{g}}-(P_{\text{LD}}+\text{j}Q_{\text{LD}})=V_k\left(\sum_{j=1}^{n}Y_{kj}V_j\right)^*$$

若节点注入功率是给定值，则上式中节点电压 V_j 可用迭代法求解，迭代公式为

$$V_i^{(k+1)}=g(V_{\text{bus}}^{(k)})=\frac{1}{Y_{ii}}\left(\frac{P_i^{\text{sch}}-\text{j}Q_i^{\text{sch}}}{V_i^{*(k)}}-\sum_{j=1}^{n}Y_{ij}V_j^{(k)}\right)$$

式中，Y_{ii}、Y_{ij} 为节点 i 的自导纳和互导纳；P_i^{sch}、Q_i^{sch} 为节点 i 注入有功功率和无功功率的给定值；k 为当前迭代次数。

若迭代是一个收敛过程，那么用 $V_i^{(k+1)}$ 代替 $V_i^{(k)}$ 可以得到更好的收敛结果。所以，在一次迭代中得到的节点电压值，既可在下一次迭代中使用，也可立即用于本次迭代的后续方程中。如果所选择的初值比较接近于真实解，那么高斯-赛德尔方法具有线性收敛速度。

值得注意的是，将传统潮流计算方法应用于辐射型结构的配电网时，其性能会变差。原因是配电网中节点之间的连通支路很少，这样，上一次迭代形成的节点电压值，只有少数对本次迭代的节点电压值的修正有贡献，这就导致节点电压向节点方向的变化很缓慢，算法收敛性差。

3.3.2 牛顿-拉夫逊方法

牛顿-拉夫逊方法先给定节点电压（幅值 V_i、相位 θ_i）初值，然后计算节点功率误差 ΔS：$\Delta S=\Delta P+\Delta Q=S_{ij-i}^{\text{sch}}-(V_i^{(k)})^*(\sum Y_{ij}V_j^{(k)})$，并以 $\Delta S\leqslant\varepsilon$ 作为迭代的收敛条件，其中 ε 为指定的容许误差。该算法的修正方程为

$$\begin{bmatrix}\Delta P^{(k)}\\ \Delta Q^{(k)}\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}H^{(k)} & N^{(k)}\\ M^{(k)} & L^{(k)}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\theta^{(k)}\\ \Delta V'^{(k)}\end{bmatrix}=-J^{(k)}\begin{bmatrix}\Delta\theta^{(k)}\\ \Delta V'^{(k)}\end{bmatrix}$$

式中，$\begin{aligned}\Delta\theta^{(k)}&=[\Delta\theta_1^{(k)}\quad\Delta\theta_2^{(k)}\cdots\Delta\theta_m^{(k)}]\\ \Delta V'^{(k)}&=[\Delta V_1^{(k)}/V_1^{(k)}\quad\Delta V_2^{(k)}/V_2^{(k)}\cdots\Delta V_n^{(k)}/\text{V}_n^{(k)}]\end{aligned}$，$H^{(k)}$、$L^{(k)}$、$M^{(k)}$、$N^{(k)}$ 为雅可比矩阵 $J^{(k)}$ 中的分块矩阵。

根据上述方程求得修正量 $\Delta\theta^{(k)}$、$\Delta V'^{(k)}$ 后，即可进一步得出

$$\theta_i^{(k+1)}=\theta_i^{(k)}+\Delta\theta_i^{(k)}$$

$$V_i^{(k+1)}=V_i^{(k)}+\Delta V_i^{(k)}$$

电压可采用直角坐标形式：$e+if$，或极坐标形式：$V\angle\theta$。相应地，上述迭代方程也具有直角坐标或极坐标形式。

牛顿-拉夫逊方法适应于大规模潮流计算。但由于每次迭代中其计算量较大，所以将其应用于辐射型配电网时反而效率不高。另外，当系统的雅可比矩阵为奇异阵，或系统呈病态（如 X/R 比值较小）时，该方法难以适应。

3.3.3　快速解耦方法

快速解耦方法利用小角度近似原理消去雅克比矩阵中数值相对较小的元素，从而达到简化雅克比矩阵的目的，所以这是一种潮流计算的高效算法。但当系统中 X/R 比值较小时，其收敛性较差。另外，电压 V 与有功功率 P 之间，以及相角 θ 与无功功率 Q 之间的关联性也会导致该方法收敛性变差。

快速解耦方法利用了下述假设：

由于实际系统中各元件两端电压相位差不大，可假设 $\theta_k-\theta_m\approx 0$，则有 $\cos(\theta_k-\theta_m)\approx 1$，$\sin(\theta_k-\theta_m)\approx 0$。由于节点电压都接近于额定电压，可认为 $V_k\approx 1$。

又由于 $r_{km}\ll x_{km}$，可知 $g_{km}\approx 0$。

这样，雅可比矩阵可得到大量简化，并且无需在每次迭代中重新形成雅可比矩阵。该近似方法利用了有功功率与电压幅值、无功功率与电压相位之间的低耦合性。

在形成简化的雅可比矩阵 J 之后，快速解耦方法利用以下方程组完成潮流的迭代求解：

$$\begin{bmatrix}\Delta\theta\\ \Delta V\end{bmatrix}=-[J]^{-1}\begin{bmatrix}\Delta P\\ \Delta Q\end{bmatrix}$$

式中，方程左侧为修正量。当功率误差满足收敛条件，或者达到最大迭代次数时，迭代停止。

在利用上述三种方法之一求解出各节点的电压和相角后，就可以利用网络方程进一步计算出网损和功率因数等参数，以及节点间传输功率。这样，通过与在线实时数据测量相结合，可以完成智能电网条件下的潮流分析。

3.3.4　配电网潮流方法

经典的配电网潮流方法有如下特点：

1）所针对的配电网系统具有辐射型或少网孔型结构。

2）线路具有较高的 R/X 比值。

3）利用配电网潮流程序处理单相负荷。

4）分布式发电、可再生能源发电及装在接近负荷中心的热电联供系统。

5）配电网系统中含有很多短线路，这些线路一般阻抗较小。

由于快速解耦潮流法无法很好地处理线路 R/X 比值较大的病态系统，因此上述介绍的潮流计算方法[12]均需要加以改进才能应用于低压配电网络中。配电网通常有如下潮流方法：

1）求解支路电流或潮流的前推回代方法。

2）利用回代法计算节点电压。

3）利用功率偏差型牛顿法迭代求解节点电压。

4）利用 Z_{BUS} 高斯法迭代求解分支电流。

方法 1：前推回代法。这种方法将配电网看做树形拓扑网络，其中系统的松弛母线作为树的根节点，其他线路作为树的枝叶节点。该方法从根节点起按广度优先搜索并对枝叶节点进行分层编号，编号反映了前推回代的顺序。对于弱环状结构网络，需通过解环、计算补偿电流等处理将其变为辐射状网络后再进行后续计算。

回代过程将线路电流或潮流按从馈线末端（树叶）至松弛母线（树根）的顺序进行叠加。算法流程为：

1）确定系统松弛母线，确定根、节点及剩余各母线的初始电压与相角。

2）计算节点注入电流，k 为当前迭代次数：

$$I_i^{(k)} = \left[\frac{S_i^{\text{sch}}}{V_i^{(k-1)}}\right]^*$$

3）从母线电压已知的根节点开始，逐步向终端枝叶节点进行计算。

4）计算节点 j 的电压：

$$V_j^k = V_i^k - Z_{ij} I_{ij}^{(k)}$$

式中，Z_{ij} 为母线 i、j 间的线路阻抗；V_j^k 为母线 j 的最新电压值。

5）判断相邻两次迭代的功率偏差是否小于收敛条件：

$$\Delta S_i^{(k)} = S_i^{\text{sch}} - V_i^{(k)} (I_i^{(k)})^* \leqslant \varepsilon$$

6）如果上述条件未得到满足，则重复进行以上步骤直至误差小于容许值。

步骤 2）中，各支路的电压值可由负荷功率 S 推得。其中，V_i^{k-1} 是第 $k-1$ 次迭代时的母线电压值；$I_i^{(k)}$ 为第 k 次迭代时的注入电流值。由支路末端向根节点进行回推，即可更新各支路的电流值。

方法 2：基于灵敏度矩阵的补偿算法。适用于配电网的改进前推回代法能够利用灵敏度矩阵补偿系统功率差额。针对该特点，可以得到用于配电网潮流计算的改进牛顿-拉夫逊方法。

对于图 3.1 所示的单条馈线，算法流程为：

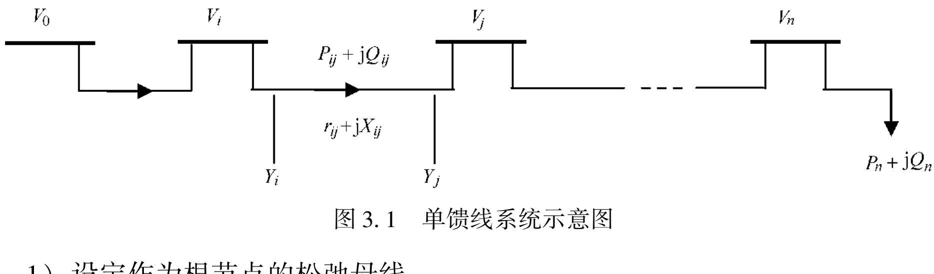


图 3.1　单馈线系统示意图

1）设定作为根节点的松弛母线。

2）设定松弛母线节点的注入功率 P_0、Q_0 等于系统总负荷。

3）各分支潮流等于其下游接入负荷之和，每次迭代从电压值已知的松弛母线开始。

4）获得当前第 k 次迭代的电压和潮流 V^k、P_{ij}^k、Q_{ij}^k。

5）计算功率损耗 f（V^k，P_{ij}^*，Q_{ij}^*）。

6）根据损耗计算馈入功率 P_{ji}、Q_{ji}、V_j。

7）馈入功率满足本支路负荷需求后，剩余功率馈出到下一条分支线路。

8）当功率差额为零时，应有 ΔP_i、$\Delta Q_i=0$；因此，若潮流误差小于规定的容许值 ε，则潮流收敛。

9）更新灵敏度矩阵中的松弛母线功率值。

方法3：节点阻抗网络法。该方法利用节点阻抗矩阵与等效注入电流来求解配电网网络方程。系统母线电压求取建立在叠加原理的基础上[3,4]，在确定松弛母线电压并计算出网络注入电流引起的电压增量 ΔV 后，则可得到其余各母线电压值。算法流程为：

1）假设系统处于空载状态。

2）基于松弛母线电压值确定系统内各负荷母线的电压初始值。

3）根据负荷电流调整节点电压。

4）每次迭代时随着系统变化调整注入电流。

5）等效注入电流值由 $I_i^{(k)}=(S_i^{\text{sch}}/V_i^{k-1})^*$ 计算得出。

6）由 $\Delta V_{\text{bus}}^{(k)}=Z_{\text{bus}}I_{\text{inj}}^{(k)}$ 得到电压增量 ΔV，其中 Z_{bus} 为一 $\eta\times\eta$ 阶节点阻抗矩阵。

7）根据式 $V_i^{k-1}=V_0-\Delta V_i^{(k-1)}$ 得到系统内各母线电压值，其中 V_0 为松弛母线电压值。

8）检查各负荷母线功率差值 $\Delta S=S^{\text{spec}}-\sum V_i^{\text{calc}}I_{ij}^{\text{calc}}$，当 $\Delta S\leqslant\varepsilon$ 时迭代停止。

9）否则，返回步骤3重复上述流程。

现有的输配电系统潮流方法大多基于：①稀疏技术；②隐式节点矩阵；③计算技术。这些方法详见于各种文献资料，其优缺点及适用领域已被各种软件包所验证。然而，对于智能电网，上述方法很难满足其潮流计算需求。

可用传输能力（Available Transfer Capability，ATC）是指同一电力系统不同区域间的最大附加传输容量。“附加”意味着现有传输容量仅是基础值的一部分，并不包括在ATC值内。“最大”一词则意味着无论系统正常运行还是发生异常情况，当传输容量处于该值范围内时，其提升都不会导致系统发生过负荷现象。典型意义上的ATC过程通常考量控制区域或任意功率注入区域间的容量传输。

根据上述定义，ATC可通过下式计算得出：

$$\text{ATC}=\text{TTC}-\sum(\text{CBM},\text{TRM},\text{ETC})$$

式中，TTC（Total Transfer Capability）为最大传输能力；CBM（Capacity Benefit Margin）为容量效益裕度；TRM（Transmission Reliability Margin）为输电可靠性裕度；ETC（Existing Transmission Commitments）为现有输电协议所占用的输电容量。

ATC诠释出了电力系统可靠性与电力市场效率间的平衡关系，其对系统可靠

性与市场化布局均有重大影响，因此 ATC 的结果正逐渐成为电力行业各方感兴趣的问题。

功率传输分布因子的作用与求取。功率传输分布因子（Power Transfer Distribution Factor，PTDF）用于衡量线路有功潮流的变化引起系统有功传输变化的灵敏度。根据网络分析理论，线路潮流是其首末端母线电压与相位的简单函数。因此，功率传输分布因子即可表示为线路电压幅值与相角的灵敏度的函数。

单次线性步进 ATC 算法的求解速度很快。在建立事故对传输能力的影响模型时，线性化具有很高精度。然而，它仅使用系统当前运行点附近的变化量，并且无法模拟网络传输能力达到上限时控制策略的变化。此外，系统中还会使用诸如移相器等特殊设备，可以改变关键传输断面的潮流分布。

3.4　阻塞管理效果

阻塞是指因电网潮流过大而引起最大热负荷、电压稳定、N-1 安全规则等运行限额遭到破坏的情况。净传输容量（Net Transmission Capacity，NTC）定义了在基本注入功率的情况下，区域 A 和区域 B 之间潜在的剩余传输容量。

在具有多网孔拓扑结构的电网中，区域间注入功率的变化将影响断面潮流，这是影响网络传输容量的重要因素。上述变化会在已有注入功率方案的基础上产生叠加的潮流。考虑注入功率的变化量可以更好地估计网络传输容量，从而得出更为精确的长期传输容量的衡量指标。

描述一个实际的电力系统需要建立大型的方程组，为此，需要采用数值计算方法来求解潮流与节点电压。最基本的潮流计算方法是牛顿-拉夫逊迭代算法，这是一种交流潮流算法。对于高压输电线路而言，可假设线路的阻抗主要呈感性，这样，可以通过潮流方程的解耦方法来减少计算量。再进一步，如果假设输电线路为纯电感性，就可以忽略线路上的有功损耗，从而将交流潮流简化为直流潮流。假设系统有足够的无功功率注入，使得系统中各节点电压能够稳定在正常水平并保持不变，则交流潮流的迭代方程组可以简化为直流潮流的线性方程组。直流潮流方程组可用于仿真注入功率对输电网络潮流的影响。

$$\begin{bmatrix} ISF_{1,1} & \cdots & ISF_{1,k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ISF_{n,1} & \cdots & ISF_{n,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{nj_1} \\ \vdots \\ I_{nj_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} flow_1 \\ \vdots \\ flow_n \end{bmatrix}$$

节点 i 的注入功率为该节点的发电功率减去负荷功率。注入功率转移因子（Injection Shift Factor，ISF）代表节点 k 的注入功率变化时引起线路 n 潮流变化的比值。两个不同节点的注入功率转移因子（ISF）的差值可以确定功率传输分布因子（PTDF）。PTDF 定义了两个节点之间的传输功率变化时引起的线路潮流的变化量。

3.5　用于智能电网设计的潮流计算

潮流计算要与智能电网随机的问题研究结合起来，这是本节讨论的内容。

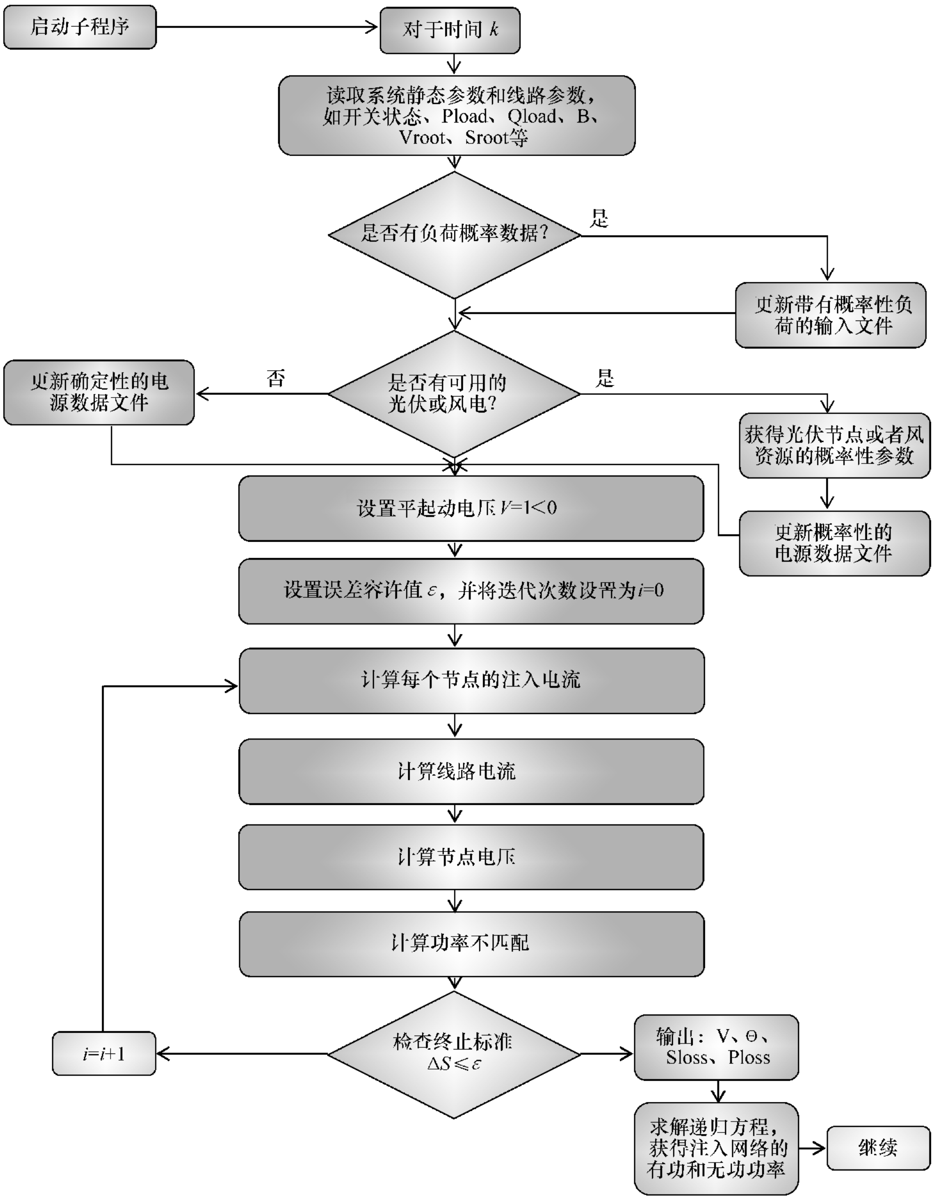


图 3.2　提出的潮流计算方法

需对现有算法进行扩展，以使其具备如下能力：

1）算法的输入模型中应考虑可再生能源[2,5]，负荷模型中也应考虑波动性。输入中还应包含配电网潮流，以便对有功、无功拥塞做出更好的估计。

2）由于可再生能源的负载具有分布性，系统的稀疏性会受到影响。因此，应考虑负载以及可再生能源的容量。

3）因可再生能源的随机性模型给计算带来的挑战。模型的随机性会影响计算的独立性。

以上潮流计算方法也能用于配电网中（见图 3. 2）。

3. 6 随机动态最优潮流（DSOPF）在智能电网中的应用

自适应动态规划（Adaptive Dynamic Programming，ADP）是一种在 DSOPF 的实现中结合了时间框架的计算智能技术[1,2]。

需要一个通用的框架来解决电力系统的各类问题，规划人员、领域专家等可以在这个框架内提出他们所面临的各种挑战性难题。在这个框架中，知识可被收集并发布到 Web 中供分享，各种工具通过网络申请和调用。DSOPF 框架分为三个模块，它将自适应动态规划用于解决最优潮流技术所面临的一系列问题，如图 3. 3 所示。

模块 1：读取电力系统参数，并通过分布函数估计数据中存在的测量误差，确保并提高数据的准确性。通过时间序列和动态系统方法，推断历史数据和未来数据之间的关系，并确定出各种情况下发电数据随时间变化的近似模型。定义模型的不确定度，并确定问题的目标和约束函数。

模块 2：确定系统运行的允许区域，并确定紧急状态及在各种预想事故下的运行限额。计划并列举出控制方案，针对每种预想事故和紧急状态，做出相应的控制策略调整。协调不同的控制手段并根据出现的变化进行事后优化。评估控制结果并进行灵敏度分析。

模块 3：通过对事后优化算法进行成本效益分析，评估不同控制策略的成本效率和效益。能够进行上述分析的大型网络，对于电力系统而言是必不可少的。通过最优化技术，基于自适应动态规划的评价网络可以实现成本效益（Cost Effectiveness）和成本效率（Cost Efficiency）的双重目标。

随机动态最优潮流（DSOPF）开发案例

DSOPF 由本书作者提出。与其他通用软件一样，DSOPF 算法[8]也应满足可控性、可靠性、适应性、安全性等衡量标准。

1）可控性和互操作性：这一点对系统意义重大。当系统中有多种设备，设备之间存在交互与协作关系，算法的可控性和互操作性将提高设备、系统、子系统的可观性。

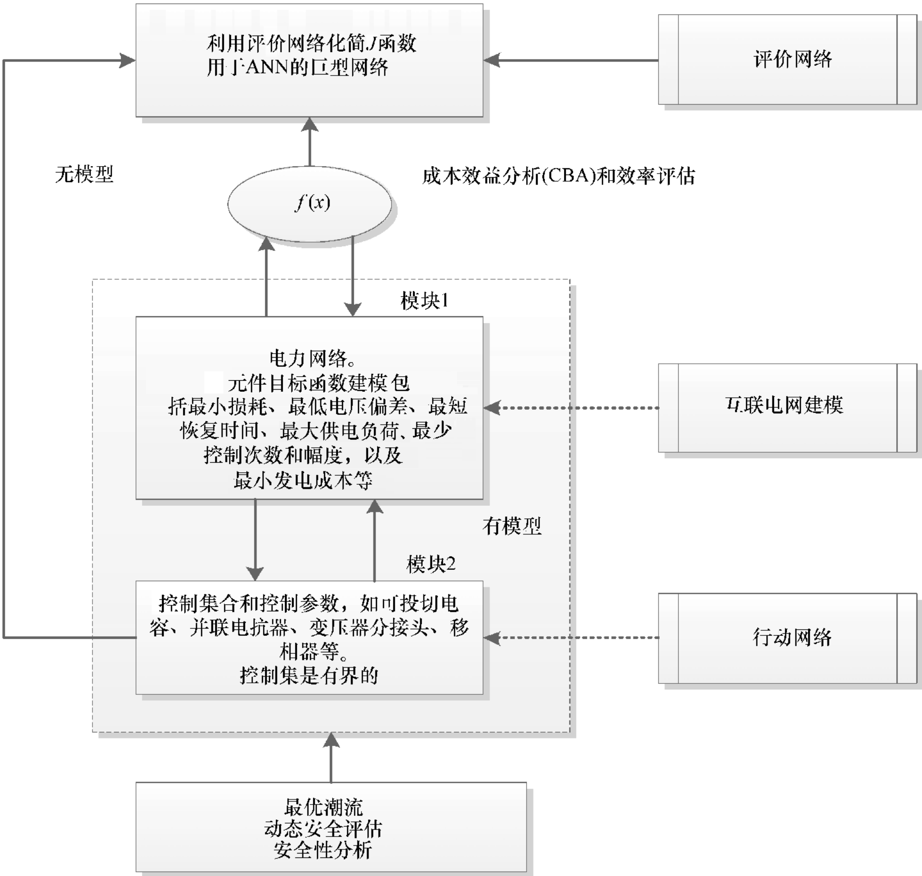


图3.3　电力系统自适应动态规划应用框架[3]

2）可靠性：提升电能传输的质量，并保持电压稳定，是智能电网的一项基本要求。

3）适应性和持续性：电网能够适应外部的扰动；长久维持日常生活和人类文明的电能供应。

4）可预期性和安全性：电网能适应不同的运行模式，在保证安全稳定的同时，能够动态地调整以适应外界的扰动和变化。

3.7　静态安全评估（SSA）和预想事故分析

系统安全性是指电力系统以最小的供电中断来承受可能遭受的扰动的能力。在实际运行中，安全评估涉及对系统在经受可能的破坏性事件时的脆弱性进行实时的

预测。

由于系统维护、非计划停运以及负荷变化等因素，实际的系统运行状况总是不断发生变化。当系统进入不安全状态时，几种可以改善不安全状况的重要措施包括起用备用机组、调整发电计划或者向周围电网借电。图 3.4 为 DyLiacco 提出的安全状态图，图中显示了系统的主要运行状态。

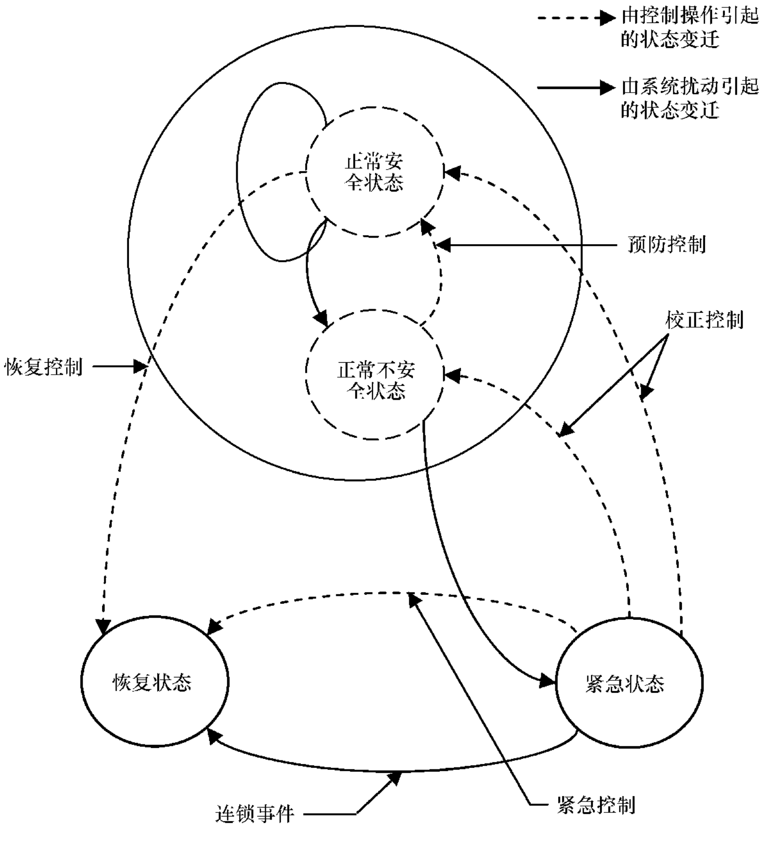


图 3.4　DyLiacco 的安全状态图

1）安全状态或正常状态：所有的系统负荷的电压都位于允许范围内。

2）紧急状态：部分运行限额遭到破坏，如某些线路过载。

3）恢复状态：失去部分负荷，即系统出现部分或全部停电，但未失电的子系统处于正常状态。

假设某条输电线路因故障而停运，这将导致系统中潮流的重新分配以及节点电压的变化。如果系统依旧处于安全状态，那么对此次事件而言，扰动前的系统状态就属于正常安全状态。但如果由此导致系统进入紧急状态，则扰动前的系统状态就

为正常不安全状态。类似地，如果系统处于紧急状态，可以通过一些校正控制使之恢复到正常状态。不过，视紧急情况的严重程度，在此过程中可能会采取一些切负荷措施，以防止系统安全状况的进一步恶化，例如，防止系统解列为子系统（如进入恢复状态）。当系统处于恢复状态时，主要任务包括对所有中断负荷恢复供电。

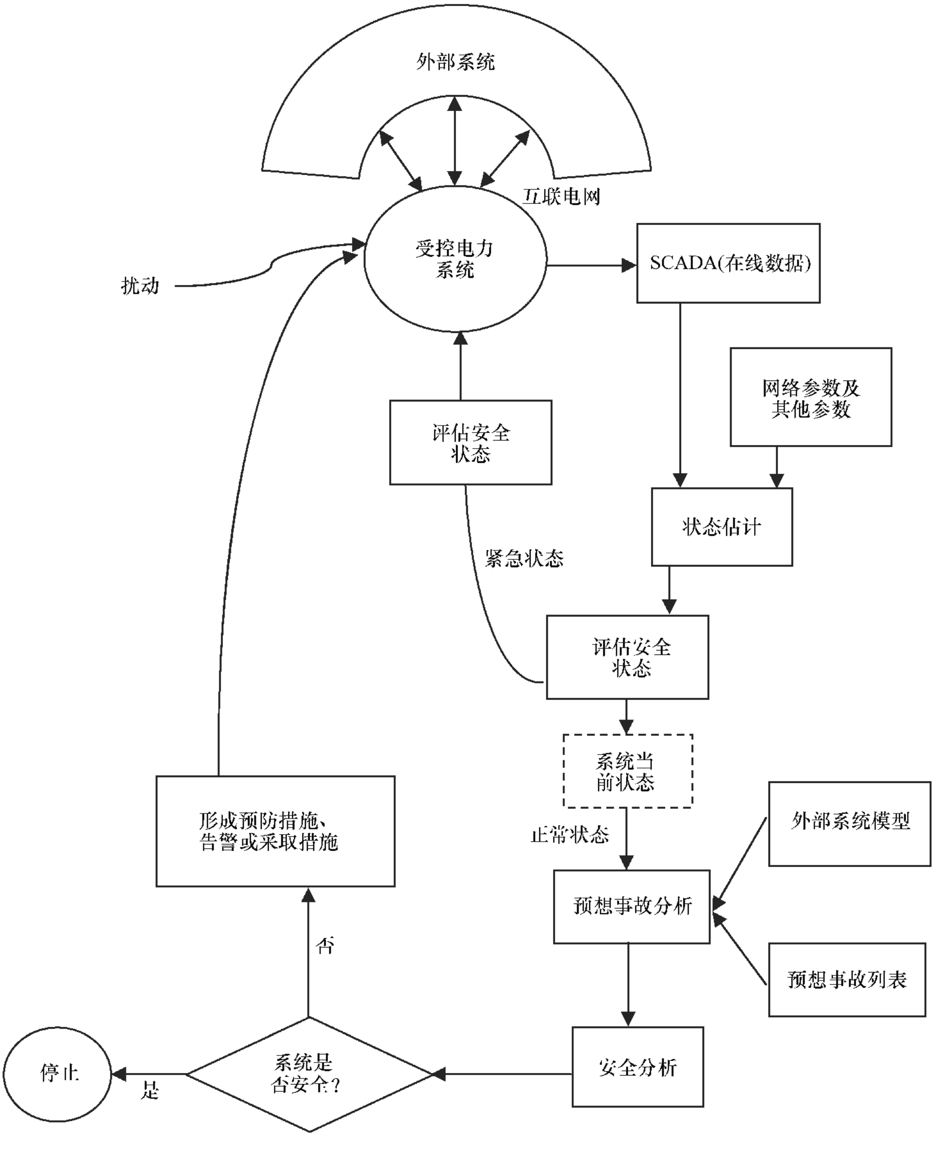


图 3.5　系统安全以及相关功能

稳态安全包括扰动后系统暂态过程已经衰减，但系统不能承受某些长时间越限的情况。例如，在暂态过程结束后系统失去一回输电线路，这将导致系统中出现局部过负荷或过电压。系统可以短时承受越限，在此期间应采取校正控制措施。如果校正控制无法实施，则认为扰动前系统处于严重的不安全状态，需要采取预防控制措施，系统分析工具应能评估系统安全状况并给出稳态运行方案，例如，通过潮流计算及其他相关分析方法。

图 3.5 中的框图说明了与在线安全分析相关的功能。状态估计器的输出可直接用来判断安全状态（正常或紧急）。如为紧急状态，那么就要确定下一步所需采取的校正命令并及时执行以防状态恶化；如为正常状态，通常我们无法知晓一个假定的扰动是否会导致系统进入紧急状态，为此需进行预想事故分析。预想事故分析有三个数据输入源：预想事故前状态（状态估计器的输出）、外部系统的模型、预想事故列表。事故分析的结果会做进一步再评估以检验系统的安全等级。这个过程被称为安全分析。安全分析的结果将为后续操作提供所需信息。如果系统被确认为安全，则直到下一个分析周期（30min 或 1h 后）不会执行任何操作；相反，如果系统被确认为不安全，就需对预防控制措施进行评估但不一定立即执行。因为预防措施会影响经济运行，所以需由调度人员对采取预防控制措施的利弊进行综合判断。

3.8　预想事故及其分类

稳态预想事故分析能够预测在线路、变压器停运和发电机停机后的系统潮流和电压分布情况。导致线路、变压器停运的原因有很多。最通常的原因是计划检修，其他原因包括通过倒闸操作来控制系统潮流和节点电压。在上述两种情况下，停运都是由调度员执行日常调度以及检修任务引起的。而另一类停运被称为强迫停运，比如一条线路在发生永久性故障后被断路器自动切除，或者线路、变压器在过载后被保护性切除。无论哪种情况，调度员都需要知道设备停运会对系统潮流和电压造成什么样的影响，这样才可以在停运发生前采取有效的预防措施。在执行计划检修时，调度员需要一份针对计划停运的潮流预测数据。为了控制潮流和电压而执行倒闸操作时，调度员也需要当前的潮流数据。

强迫停运的情况更加复杂，因为其发生的概率很小且受时间与天气的影响很大。通常来说，单回线停运发生的概率要比双回线及多回线的要大，但是在恶劣的天气条件下，双回线甚至多回线停运也偶尔发生。为了避免执行大量的计算，通常只考虑单回线停运。发电机停机的原因和线路、变压器停运的原因类似，发电厂也会因其运行以及检修的要求而退出运行。由于设备故障、临近线路故障等原因也会导致发电机的强迫停机。

3.8.1　稳态预想事故分析

在线路或变压器停运的预想事故分析中，通常假定系统输入、负荷仍保持不变。这样，负荷的有功和无功功率、发电机有功功率输出以及节点电压这些给定值在停运前后为不变的常数。显然，这种线路停运模型是一种近似模型。事实上，重要输电线路的停运会引起系统潮流和电压的变化，这首先会导致系统网损的变化。在上述模型中，网损的变化最终由松弛节点的出力变化来平衡。负荷节点的电压变化通常也就意味着负荷自身的变化，尤其当负荷采用恒阻抗模型时。只有当各节点上的负荷模型都足够详细时，预想事故分析的精度才能得到提高。在大部分情况下，由上述近似模型引起的误差较之因不精确的输入所引起的误差要小。

发电机停机的情况分析起来要复杂得多，原因是多方面的。在停机刚发生后的几秒钟，剩余的机组尚无法对出力与负荷的不平衡做出迅速响应。于是，系统频率将下降。由于负荷受频率影响，会随着频率的升高或降低而增大或减少，这就会导致全网性的负荷降低。由于系统频率的下降以及与相邻电网交换潮流的计划遭到破坏，一些机组将在自动发电控制（AGC）的作用下增加出力，并在几分钟内将系统频率以及与相邻系统的交换潮流恢复到正常状态。经济调度的运用可以优化系统出力，虽然最终不一定能保证经济和环境上的最优运行。最后，在发生扰动的数分钟后系统达到新的稳态。

实际上，在智能电网的预想事故分析中也需要大量的快速解潮流解法。在所有这些技术中，分析的起点都是系统事故前状态。下面将简要讨论一些技术。

3.8.2　性能指标

系统安全类性能指标用于对各种事故的严重程度进行分级，例如：

$$J = \frac{1}{2}\sum_{k}(V_k - V_{k-\mathrm{ref}})^2 W_k$$

式中，V_k 为节点 k 电压幅值；$V_{k-\mathrm{ref}}$为节点 k 电压参考值（一般选取额定电压）；W_k 为节点权重，一般与其相对重要度或容许的电压变化范围相关。

J 的初值为 J_0，对应事故前状态。第 i 次事故，J 取 J_i。事故根据 J_i 的值来分级。由于 J_i 的平方特性，严重的事故会明显导致 J_i 值变大。

另一种类似的性能指标是根据输电线路的潮流限额，例如

$$J' = \frac{1}{2}\sum_{k} W_k\left(\frac{T_k}{T_{k\max}}\right)^2$$

式中，T_k 为输电线路 k 的实际潮流；$T_{k\max}$为其最大潮流限制；W_k 为权重因子。

外部系统等值。对于在线控制和调度，受控系统常与其他系统互联。一般

来说，系统内部事故对该系统的影响最大。然而总存在这样的情形，一个系统内的事故对另一个系统也造成了严重的影响，例如，大型发电机组的退出会引起其他系统的潮流越限。对事故影响的预测之所以困难，是由于对外部网络的监视信息不如对内部网络那么详尽。利用状态估计技术，内部网络的电压幅值与相角、潮流、发电量、负荷和网络拓扑都可以在线获得。而对于外部网络，在线信息通常仅限于联络线潮流、重要线路和机组的状态，以及某些机组的输出功率。

在求解预想事故发生后的精确潮流时，需要知道整个网络（包括内部和外部网络）的状态来建立事故前的基准潮流。由于外部网络的状态无法完全获知，需要做一些简化处理。本节将讨论两种简化处理方法：第一种基于灵敏度分析；第二种基于网络化简。在介绍这些之前先引入一些重要术语。

分析的起点是所谓的基准潮流解。在规划研究中，基准潮流是在给定负荷、发电和网络配置情况下的完整网络解。而在在线调度中，这是指利用实时测量数据经在线状态估计求取的内部系统和边界系统的潮流解。

在出现线路停运或发电机组事故时，可以在基准潮流解的基础上计算内部系统的潮流。已有边界节点的类型一般会保持不变，但有时负荷边界节点会被重新分类为发电机节点。例如，如果负荷边界节点靠近一个强壮外部系统的电源中心，那么在外部系统的支撑下，其电压水平就会保持或接近恒定值。事实上，一些调度人员习惯于将所有边界负荷节点重新分类为发电机节点，因为他们发现这样能获得更为精确的解。

完成网络等值的步骤如下：

1）采用合适的技术进行网络化简。

2）完成基准潮流解（事故前），计算边界节点的注入功率。

3）根据需要，将一些边界节点重新分类为发电机节点。

4）形成预想事故列表。

5）遍历列表中的预想事故，利用基准潮流进行快速潮流计算和事故评估。

3.8.3　灵敏度分析方法

由上可见，外部等值网络依赖于外部网络中节点的注入有功、无功功率和电压幅值。在发生线路停运或发电机事故后，外部网络的节点电压甚至注入功率都会发生变化。这就意味着事故后需重新进行等值，这显然完全破坏了网络化简的本来目的。更为关键的问题是，在实时在线的计算环境中，外部系统的注入功率和电压是未知的（无法实时获得）。

有两条可能的解决途径。在途径 1 中，需要在离线分析阶段选取对外部状况和内部停运不灵敏的子系统进行等值化简。如果能够找到满足条件的子系统，那么下一步就利用在线测量数据来校准等值线路的参数值和注入功率。

3.9　智能电网预想事故研究

在集成的智能电网环境中，为了评估机组或线路停运所造成的后果，推荐在规划和运行中使用预想事故分析工具。预想事故分析包括单线路停运和多线路停运分析，称为 $N-1$，$N-2$，$N-3$，…分析。预想事故有两种类型：

1）基于交流潮流的自动事故扫描/过滤。

2）基于交流潮流的自动事故控制。

预想事故集的使用场合包括：

1）用于静态安全分析（SSA）和动态安全分析（DSA）。其中，静态安全分析包括以下元素：

a. 基准潮流；

b. 事故计划；

c. 为每个预想事故建立性能指数（PI）模型。

2）提供指定限额下的越限检查的研究，并对越限的预想事故（PI≤限额）按其越限程度做升序排列。

3）设计安全分级指标，以改善事故提示与屏幕显示的效果。

静态安全分析广泛应用于经典电力系统分析。其缺点有：

1）如何确定测量值权重。

2）指数因子。

3）如何确定预想事故的概率。

4）缺乏决策支持知识库所需的人工智能和相关信息。本书作者在研究中曾尝试使用专家系统（ES）、人工神经元网络（ANN）和模糊集。这些方法没有考虑电源的时变性以及事故分析中参数的选择问题。

作者提出一种 ACS 方法，该方法能够：

1）考虑可再生能源输出功率的波动性，将其视为一种预想事故。

2）性能研究所需测量数据存在缺失。

3）考虑事故发生的概率。

4）利用 PI-OSIsoft[㊀]系统采集的带时间戳的测量数据代替性能指数（PI），基于分类行为和预想事故影响分析法，实时预测、分析和查看推荐的运行策略，从而形成一种新型研究方法。

现在有很多机会设计新的算法，以支持在智能电网中配置用于系统安全性、可靠性、可持续性和经济可承受性分析的高级工具。

㊀ PI-OSIsoft 是美国 OSI Software 公司开发的基于 C/S、B/S 结构的实时数据库系统平台。——译者注

3.10 小结

本章讨论了智能电网设计、运行和性能分析的几种必要工具，包括潮流、最优潮流和静态安全评估以及预想事故分析。此外还回顾了经典方法并详细介绍了每种方法与智能电网的结合方式。

参 考 文 献

[1] M.H. Mickle and T.W. Sze. *Optimization in Systems Engineering*. Scranton, 1972.

[2] M.E. El-Hawary. *Electrical Power Systems Design and Analysis*. IEEE Press Series on Power Engineering, 2008.

[3] J.A. Momoh. *Electric Power System Application of Optimization*. Marcel Dekker, New York, 2001.

[4] J.L. Marinho and B. Stott. "Linear Programming for Power System Network Security Applications." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 1979, PAS-98837–848.

[5] R.C. Eberhart and J. Kennedy. "A New Optimizer Using Particle Swarm Theory." In *Proceedings on the Sixth International Symposium on Micromachine and Human Science*, 1995, 39–31.

[6] A.G. Barto, W.B. Powell, D.C. Wunsch, and J. Si. *Handbook of Learning and Approximate Dynamic Programming*. IEEE Press Series on Computational Intelligence, 2004.

[7] J. Momoh. *Electrical Power System Applications of Optimization*. CRC Press, 2008.

[8] L. Zhao and A. Abur. "Multiarea State Estimation Using Synchronized Phasor Measurements." *IEEE Transactions on Power Systems* 2005, 20, 611–617.

[9] "Appendix B2: A Systems View of the Modern Grid-Sensing and Measurement." *National Energy Technology Laboratory*, 2007.

[10] T. Bottorff. "PG&E Smart Meter: Smart Meter Program," NARUC Summer Meeting 2007.

[11] D. Zhengchun, N. Zhenyong, and F. Wanliang. "Block QR decomposition based Power System State Estimation Algorithm." *ScienceDirect* 2005.

[12] M.S. Srinivas. "Distribution Load Flows: A Brief Review." IEEE Power Engineering Winter Meeting 2000. Vol. 2, pp. 942–945. August 2002.

推 荐 阅 读

M. Dorigo and T. Stutzle. "The Ant Colony Optimization Metaheuristic: Algorithms, Applications and Advances." In F. Glover and G. Kochenberger, eds.: *Handboook of Metaheuristics*. Norwell, MA, Kluwer, 2002.

M. Dorigo and T. Stuzle. *Ant Colony Optimization*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2004.

A. Englebrecht. *Computational Intelligence: An Introduction*. John Wiley & Sons, 2007.

B. Milosevic and M. Begovic. "Voltage-Stability Protection and Control Using a Wide-Area Network of Phasor Measurements." *IEEE Transactions on Power Systems* 2003, 18, 121–127.

A.G. Phadhke. "Synchronized Phasor Measurments in Power Systems." *IEEE Computer Applications in Power* 1993, 6, 10–15.

G. Riley and J. Giarratano. *Expert Systems: Principles and Programming*. PWS Publisher, Boston, 2003.

P.K. Skula and K. Deb. "On Finding Multiple Pareto-Optimal Solutions Using Classical and Evolutional Generating Methods." *European Journal of Operational Research* 2007, 181, 1630–1652.

C.W. Taylor. "The Future in On-Line Security Assessment and Wide-Area Stability Control." *IEEE Power Engineering Society* 2000, 1, 78–83.

W.H. Zhange and T. Gao. "A Min-Max Method with Adaptive Weightings for Uniformly Spaced Pareto Optimum Points." *Computers and Structures* 2006, 84, 1760–1769.

第 4 章　智能电网稳定性分析工具

4.1　电网稳定性概述

为了满足日益增长的电力需求，电网中接入了越来越多的发电机组、可再生能源及相应的控制设备，这使得电网规模不断扩大。但是，现有发电、输电和配电系统无论从装备和技术方面都还无法满足社会和环境的要求。迄今为止，用于运行和规划的分析工具仅局限于含有发电机、母线、控制系统（如励磁机和调速器）以及柔性交流输电系统（Flexible Alternative Current Transmission Systems，FACTS）的传统电力系统的静态和动态模型的研究。而面向未来电力系统，尤其是具有预测和自适应能力的新型分析工具还几乎没有，相关的研究也很少。因此，本章首先综述已有的关于稳定性评估的研究成果，然后给出了智能电网分析和设计中所需要的新设计方法的框架。电压稳定性评估中所使用的概念和技术也将逐一介绍。

4.2　现有电压稳定性分析工具的优点与不足

下面列出智能电网分析工具中应具有的、但现有电网分析工具尚不具备的特性：

1）鲁棒性：指系统在经受扰动或者在各种不确定条件下能继续保持系统特性与行为的能力。

2）可扩展性：指系统、网络或者进程能够处理规模不断增长的业务的能力；易于被扩容的能力。

3）随机性：系统随时间变化的规律需要利用概率论进行分析。

4）预测能力：指在一定条件下对系统未来行为进行严格的、通常是定量的预测的能力。

5）自适应性：指系统能够根据外部环境或自身某部分的变化而调整自己行为的能力。

6）在线实时数据获取：指实时的数据采集。

电压稳定性分析中还常涉及如下技术：

广域测量（WAM）技术：测量内容包括电压、相角、频率、控制序列，以及用于负荷状态调整的其他可用资源。全球定位系统（GPS）变得越来越重要，可以

建立同一时间断面的系统模型；在相角测量单元（PMU）、智能电表、状态估计（SE）以及 FIDR 监视与控制等方面都取得了新的进展，增强了系统稳定性评估能力，缓解了系统越限情况，使系统运行更为高效与可靠。

相角测量单元（PMU）：PMU 是一种能够高速、同步测量输电系统中的电压、电流和频率的数字式记录仪，并能实时计算电压和电流的幅值、相角以及有功、无功潮流。PMU 数据有如下应用：

1）资产管理。

2）电压稳定性分析。

3）功角稳定性评估。

4）最优控制设计。

智能电表：一种具有双向通信能力的电子表计，除了用于电能计量外，目前还被用于天然气和水消耗量的计量。

在智能电表出现之前，具有类似计量功能的分时电表就已广为采用。但与传统的分时电表所不同的是，智能电表通常包含实时或准实时的采集模块，并在计量的基础上兼具停电通知和电能质量监测功能。这些附加特性使得智能电表的意义远不止自动抄表这么简单，而是与高级计量体系的理念相吻合。智能电表被认为是过时的分时电表的更为廉价的技术替代方案，并将广泛应用于居民、商业、工业等各类用户。虽然智能电表是智能电网的重要部分，但是仅有智能电表并不能构成智能电网。

含可再生能源的智能电网的架构设计：传统电力系统建模是围绕着集中式发电和静态负荷。针对含可再生能源的智能电网，我们提出一种新型的更具扩展性的模型方案。在这些条件下，稳定性分析方法需要在如下方面开展深入研究：

1）电压稳定性：采用概率分布函数对各种随机性电源（如风能、太阳能等）进行建模，以在电网模型中提供平均输出功率等概率统计值；利用随机时间序列方法进行负荷建模；输出的线路电压等也以概率进行表征，从而更为完整深刻地揭示系统运行状况。其步骤是：

2）依据基本负荷计算基准潮流，然后据此计算概率潮流，从而确定用于系统稳定性评估的运行点。

3）预想事故的定义或排序，可选的方法有：

a）实时蚁群算法；

b）人工神经元网络（ANN）；

c）能改善预想事故分析的混合方法；

d）采用某种新型指标进行事故扫描与评估；

e）评判系统距离电压崩溃的裕度。

以上需要根据所研究稳定事件的不同情况，综合多种模型和灵敏度分析方法以

确定系统平衡点，并采用控制措施来缓解稳定性问题。

为改善智能电网中的算法，我们进一步采用了一个实时电压指标，该指标利用了相量测量数据进行状态估计。上述步骤也做了相应修改，包括计算与可再生能源相关的系统新状态，以及利用不同时间尺度下的基准潮流数据来计算计及可再生能源的新的电压稳定性。

和经典方法相比，这里的稳定评估需要采用随机方法，它也不同于用于改善调度能力的离线分析方法。由于它可以提供关于系统状况的最新估计，该方法可以固定的时间间隔运行。

它也可以自动地触发快速稳态分析的计算引擎，其输入输出数据使用不同的方案，这些数据可用于开发系统状态可视化工具。针对智能电网而改进的稳定性分析软件将构成新一代 SCADA 或 EMS 系统软件的基础。

当系统处于紧急状况时，电源的扰动可能导致智能电网环境下的系统失稳。稳定结果边界概念是一种评估系统安全裕度的简单方法。这一点非常重要，因为这样就可以考虑利用通信基础设施采取必要的纠正性或预防性措施。通常所使用的指标有

$$潮流稳定性 = 100\% * (P_{max} - P_{base})/P_{base}$$

$$救援电压(Rescue\ Voltage)稳定性 = 100\% * (V_{max} - V_{base})/V_{base}$$

基于电压稳定临界点（VSCP）的负荷：在负荷连续变化的情况下，确定会引起电压崩溃的有功和无功功率。

这些技术能够用于解决传统电网中的经典电压稳定性问题。由于表 4.1 所列的智能电网的新特性，我们需要开发新型软件工具来最大程度地满足系统仿真的需要和迎接新的挑战。

表 4.1　新旧电网对照

方法	旧电网	新电网
负荷模型	静态的	动态的
电源	确定性的	随机的
FACTS 设备与控制	指定的	自适应的
风险管理	确定性的	随机的
保护系统	固定的	自适应的

计算衡量系统不稳定性的各种指标，本质上都是通过灵敏度分析法进行排序。简而言之，这些指标都需要计算互联系统中各接口断面的最大传输容量。这对于含有大量分布式电源、可再生能源以及分布式控制的智能电网而言尤为重要。

为此需进行暂态稳定性研究，尤其要计及可再生能源等各种新型能源形式的优化利用，以确保系统的稳定性。我们提出了如图 4.1 所示的算法，该算法包含如下实施步骤：

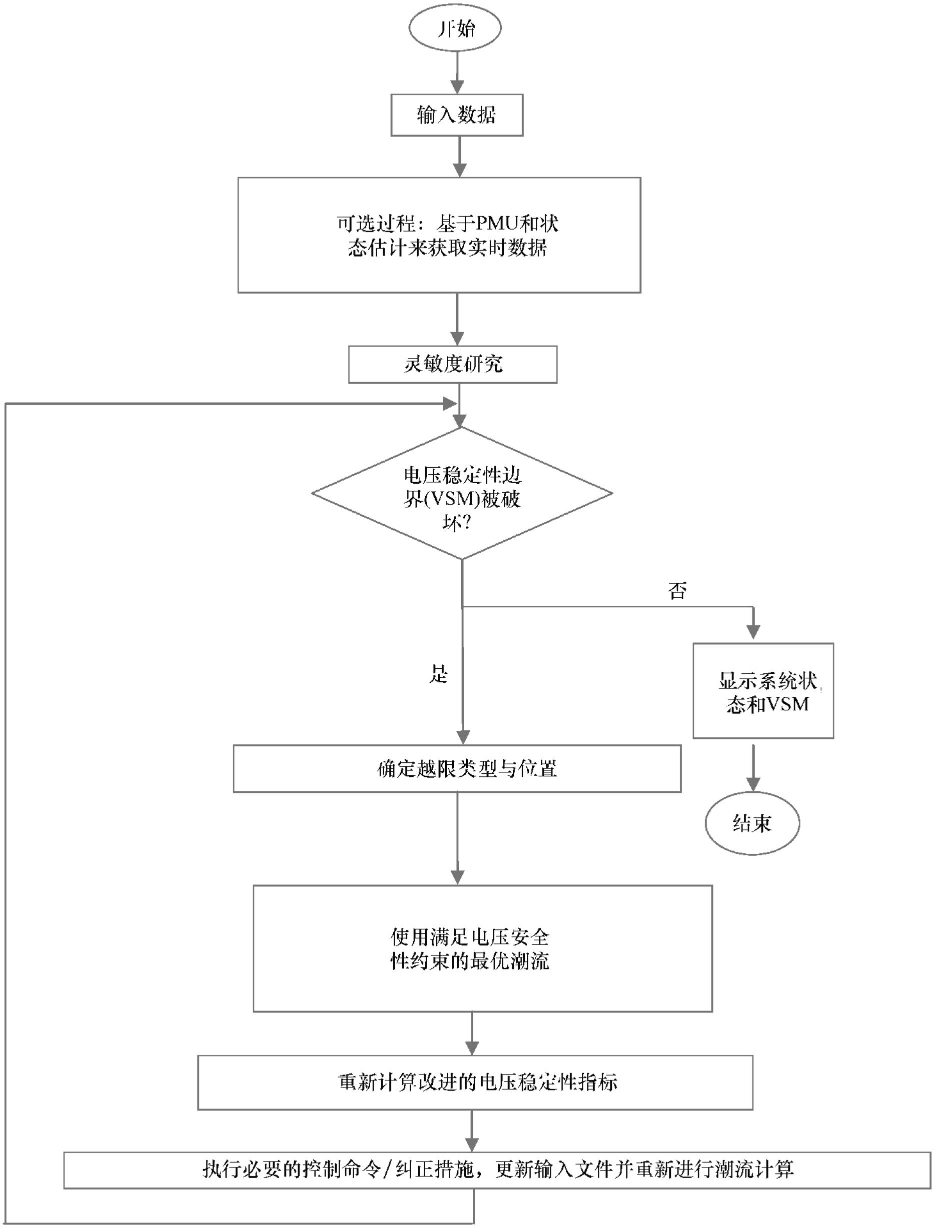


图 4.1　基于 PMU 和电压稳定性分析以增强现有电网

1）分析并定义系统的各种配置和运行工况。

2）对各种故障进行仿真，例如单相接地故障、三相故障或其他严重事故类型。

3）利用电压稳定性判据，评估支路开断、机组停运等事故的影响。

4）执行电压和功角稳定性分析。

用于暂态稳定性分析的非线性系统模型由一组微分方程和代数方程组成。一般而言，机组和控制系统利用微分方程组描述，而包含网络导纳矩阵的系统电压方程则用代数方程组描述。时域仿真方法和直接法通常用于暂态稳定性分析。前者是通过逐步法求解系统微分方程组来确定暂态稳定性的，而后者则不需要显式地求解系统微分方程组就可以确定系统的暂态稳定性。直接法已经引起人们的重视。其中，能量法是李雅普诺夫第二方法（即直接法）的一种特例，这是由于能量函数属于一种李雅普诺夫函数。

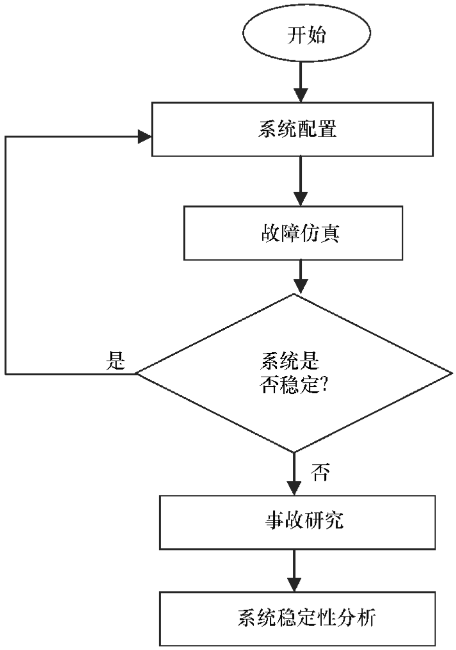


图 4.2　电压稳定研究算法

实现过程中的挑战包括：

1）它们不包括负荷变化的时间戳。

2）它们没有考虑导致系统变化的实时拓扑信息和设备信息。

3）它们不能将系统实时状态（系统参数的位置）及时通知决策人员。

我们认为，未来或正在研究中的算法应该具备如下特点：

1）利用状态估计或 PMU 数据来改善现有的系统参数，以获得更佳的数据质量。

2）基于输入数据或估算的系统参数，提出更实用的电压稳定性指标。

3）能够为决策者提供评估（预防/校正）方案。

4）提出能够防止系统崩溃或者不稳定的最优潮流方法。

值得说明的是，上述方案对于大型电力系统和需要考虑系统稳定性的配电网都是有用的。

4.3　电压稳定性评估

电压稳定性有许多定义。对于研究感应电动机、空调负载或者高压直流（HVDC）输电环节的工程师而言，电压稳定问题是一个快速的响应过程；而对其他人而言则是一个很慢的现象（比如机械式变压器分接头调节）。电压不稳定性或电压崩溃是一个动态过程，“稳定性”这个词预示着将要讨论的是一个动态系统。

电力系统显然是一个动态系统。和功角（同步）稳定性相比，电压稳定的动态性主要与负荷和电压控制方式有关，因此电压稳定性也被称为负荷稳定性。

有时输电线或发电机上的损耗也会导致电压质量下降，当电力系统重载运行或经历严重事故时由于无功功率储备不足也会出现这种现象。电压不稳定性所表现出的特点是，系统电压幅值先是逐渐下降，当系统接近崩溃点时，系统电压会急剧下降。电压稳定性分为静态电压稳定性和动态电压稳定性，后者又可进一步分为小信号稳定性和大干扰稳定性问题。

在动态电压稳定性分析中，除了发电机、励磁系统和其他控制器的模型，公式中还通常包括变压器、静态无功功率补偿装置（SVC）、感应电动机以及其他负载类型的精确模型。对于小信号电压稳定问题，通常使用一组微分方程以及一组在系统平衡点附近经过线性化得到的代数方程来阐述。分析系统的动态行为常采用特征值分析方法。小信号分析能够提供关于电压不稳定模式的有用信息，并且在确定无功功率补偿位置和控制器设计中具有指导意义。在大干扰电压稳定性中，主要是使用数值仿真技术进行分析。由于系统的动态过程在实际中很难线性化，故大干扰电压稳定问题采用非线性微分方程组和代数方程组来描述，由于上述原因，可以认为电压崩溃机理为鞍结分岔，可以运用基于中心流形的模型思想来分析电压崩溃问题。

4.3.1 电压稳定与电压崩溃

通常认为电压稳定是一个稳态问题，适合使用静态分析技术。电压稳定问题主要关注在稳态运行条件下将无功功率从无功源输送至负载的传输能力。如果系统的一个重要部分出现电压扰动超出限额的情况，那么给定一个运行状态后在可承受的给定扰动下电力系统将会面临着电压崩溃。电压崩溃可能是全局的（大停电），也可能是局部的。

假设在发生事故后系统无功功率需求急剧增加，那么这多出来的无功功率需求需由发电机和无功补偿装置所提供的无功备用来满足。在特定的事件和系统状态的组合下，这急剧增加的无功功率需求有可能会引起局部或整个系统的电压崩溃。能够导致电压崩溃的典型事件序列为：

1）靠近负荷中心有大型发电机组退出运行，导致电力系统处于异常的运行工况。为补充本地功率缺额，某些超高压输电线路出现重载，并且系统无功功率不足。

2）一条重载线路因过负荷被切除，负荷会转移到相邻线路，进而增加线路上的无功功率损耗（当线路负载超过其波阻抗负载时，线路吸收的无功功率会迅速增大），使得系统出现更为严重的无功功率缺额。

3）线路停运之后，由于需要的无功功率更多了，在负载中心处会出现较大的电压降落。这会造成负荷功率减小，从而减少线路潮流，这会在一定程度上改善系

统稳定性状况。但是，发电机的 AVR 通过增大励磁来快速恢复机端电压，将会导致在流向每一个发电机变压器时产生额外的无功功率，线路都会产生电压降落。

在这一阶段，发电机可能是处于 P-Q 输出能力的极限之内，或者说是在电枢电流和场电流受热的极限之内。调速器通过降低有功功率输出来调节频率。

1）超高压电网在负荷中心的电压降低会反映到配电网中。变电站中的有载调压变压器（Under Load Tap Changer，ULTC）能在 2～4min 内将配电电压和负荷恢复至故障前水平。随着变压器分接头的每一次调整，超高压线路上潮流的增量都会增加线路上的 XI^2 和 RI^2 损耗，而这又会进一步加剧超高压线路上的电压降低。如果超高压线路负荷很大并且超过安全完整性等级（SIL），那么线路潮流中 MVA 的增加会带来更多的线路无功损耗。

2）随着每一个变压器分接头的动作，在整个系统中发电机的无功功率输出也会随之增加。继而发电机会逐渐超越它们的无功功率承受极限（由允许的最大连续转子励磁电流决定）。当第一个发电机达到它的转子电流极限时，机端电压会下降。当机端电压下降而有功输出需保持不变时，电枢电流势必增加。电枢电流的增加可能会进一步限制无功功率的输出。部分无功负载会转移到其他发电机并容易产生更多的过载情况。随着处于自动励磁控制状态的发电机越来越少，系统更容易出现电压不稳定，同时，由于电压降低，使得并联补偿器调压的有效性降低。最终会出现电压崩溃或者连锁故障，可能导致系统失去同步。

电压安全是指系统稳定运行并在预想故障或负荷增大情况下保持稳定性的一种能力。这意味着从当前运行点到电压稳定临界点之间的负荷裕度可以抵御各种预想事故。

4.3.2 电压稳定分类

可以将电压问题分为三类：

1）第一种现象是和系统结构有关的：能够反映系统对无功功率供需不平衡的自动响应特性。

2）第二种现象是和控制行为有关的：反映一些手动或自动控制行为的反作用。

3）第三种现象是由以上两者的相互作用产生的。

这种分类意味着电压稳定涉及系统元件的静态和动态两个方面。电压崩溃动态跨越的时间范围是从不到 1s 到数十分钟。如使用时间尺度图来描述动态现象，可以给出影响电压稳定性的设备响应时间。将时间尺度分为极快速的暂态、暂态和长期过程。三个时间尺度的主要特点是：

1）极快速的暂态电压崩溃：包括响应速度非常快的 RLC 元件网络；时间变化是从微秒级到毫秒级。

2）暂态电压崩溃：包含一个较大的干扰，负载响应很快；并且故障后主要考

虑的问题通常是电动机的动态过程；时间范围是从1s到几秒。

3）长期电压崩溃：这涉及负载增大或者传输功率增加的情况；通过变压器分接头和发电机电流极限给出了负荷的恢复过程；系统运行人员的手动操作起着很重要的作用；时间范围通常为0.5～30min。

电压稳定性通常是指在一个很长的时间范围内不同系统元件所带来的影响，因此为了解决这个问题，必须考虑合适的建模和分析方法。当前，电压稳定性方法主要包括静态和动态方法，分别对应于长期电压崩溃和暂态电压崩溃。

4.3.3 静态稳定性（Ⅰ型不稳定）

假设 $\Delta\dot{x}_S=\Delta\dot{x}_F=0$，那么我们得到了静态情况，这时所有方程都是代数式。设所有电压差 $\Delta\hat{V}_g$ 和 $\Delta\hat{V}_l$ 都表示为 $\Delta\hat{V}$，那么其余代数变量便可以消去（假设负荷功率恒定），表示为 $\Delta\hat{V}=J_s^{-1}H\Delta p_L$。如果随着负荷的增加 $\det(J_s)\to 0$，这就属于Ⅰ型静态失稳，也就是说，系统不能应对新增负荷。

4.3.4 动态稳定性（Ⅱ型不稳定）

消去代数变量并假设

$$\Delta u=0,\begin{bmatrix}\Delta\dot{x}_S\\ \Delta\dot{x}_F\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A_{SS} & A_{SF}\\ A_{FS} & A_{FF}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta x_S\\ \Delta x_F\end{bmatrix}+[H_1]\Delta p_L$$

可以将动态不稳定（Ⅱ型）分为两种类型，即缓慢失稳问题和快速失稳问题。这两种情况中都假设 $\Delta p_L=0$。

缓慢失稳问题：从理论上讲运用奇异扰动理论可以消去 Δx_F 并且获得线性化后的缓慢系统如 $\Delta\dot{x}_S=A_S\Delta x_S$，但由于缓慢失稳问题所对应的时间尺度很大，因此线性化后的结果可能不能反映真实情况。对于这一长期的现象，建议使用非线性仿真方法。

快速失稳问题：首先，我们将变量 $[\Delta I_g,\Delta\hat{V}_g,\Delta\hat{V}_l]$ 重新排序为 $[\Delta I_g,\theta_1,\Delta V_1,\cdots,\Delta V_m|\Delta\theta_2,\Delta\theta_3,\cdots,\Delta\theta_n,\Delta V_{m+1},\cdots,\Delta V_n]=[\Delta z,\Delta v]$。接下来假设 x_S 为常数，负载参数也是常数，即 $\Delta p_L=0$，得到

$$\begin{bmatrix}\Delta\dot{x}_F\\ 0\\ 0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A_1 & A_2 & A_3\\ B_1 & B_2 & B_3\\ C_1 & C_2 & C_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta x_F\\ \Delta z\\ \Delta v\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ \Delta S_1\\ \Delta S_2\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}E\\ 0\\ 0\end{bmatrix}\Delta u$$

4.3.5 动态电压稳定性研究中的分析技术

近期关于电压崩溃的文献均开始研究系统和负载动态变化的影响。应该考虑的动态过程有：

1）电机和励磁系统的动态过程，包括电力系统稳定器（Power System Stabilizer，PSS）。

2）负荷动态过程。

3）SVC 控制和 FACTS 装置的动态过程。

4）变压器分接头的动态过程。

5）由于负荷频率控制（Load Frequency Control，LFC）带来的 AGC 等动态特性。

情况 1）、2）和 3）属于快速动态过程，情况 4）和 5）属于缓慢动态过程。图 4.3 较好地给出了动态电压稳定性和静态稳定性的分类过程，*Load* 表示需求；u 代表 LFC、AGC 以及变电站的电压或无功功率控制的设定点。在一个多区域电网中，x_S代表缓慢的变量，例如与变压器分接头、AGC 控制环和相角变量相关的状态变量；x_F代表快速的变量，包括发电机组的 PSS、调速器和感应电动机负载动态，SVC 动态等。整个数学模型采用以下形式：

$$\dot{x}_S = g_S(\hat{V}, u)$$

$$\dot{x}_F = g_F(x_S, x_F, \hat{V}, y, I_g, u, p_L)$$

$$0 = h_F(x_S, x_F, \hat{V}, I_g, u, p_L)$$

$$y = h_N(x_S, x_F, \hat{V}, u)$$

忽略更为缓慢的 AGC 动态和更快速的网络暂态（60Hz），我们能够将变量分为以下几类：

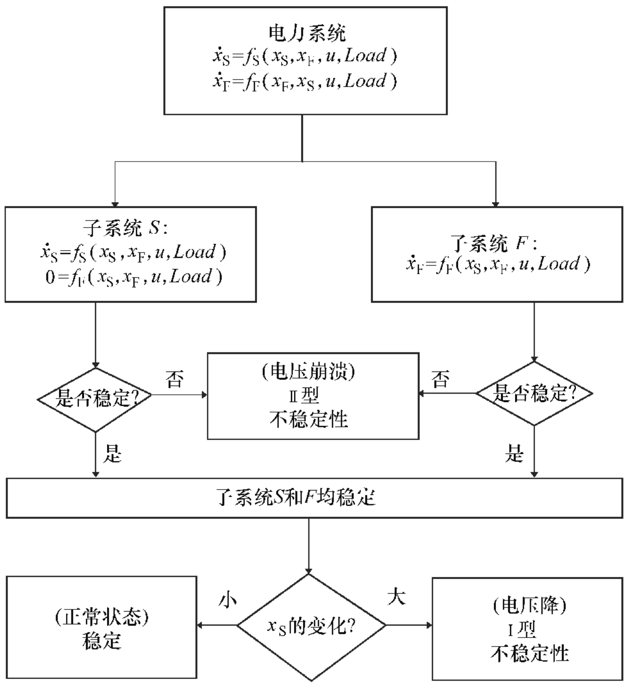


图 4.3 电压不稳定的分类

$$x_{\mathrm{S}} = [n_i] \qquad i=1,\cdots,p$$

式中，n_i为变压器抽头电压比；$x_{\mathrm{F}} = \begin{bmatrix} \delta_i \\ \omega_i \\ E'_{\mathrm{q}i} \\ E'_{\mathrm{d}i} \\ E'_{\mathrm{fd}i} \\ V_{\mathrm{R}_i} \\ R_{\mathrm{f}i} \end{bmatrix}$分别对应第 i 个电动机的转角、转速、转子电气量，$i=1$，…，m，以及励磁系统变量；$\hat{V}_i = \begin{bmatrix} V_{\mathrm{D}i} \\ V_{\mathrm{Q}i} \end{bmatrix}$为第 i 个节点电压（直角坐标）或$\begin{bmatrix} \theta_i \\ V_i \end{bmatrix}$（极坐标）；$y = \begin{bmatrix} P_{\mathrm{G}i} + P_{\mathrm{L}i} \\ Q_{\mathrm{G}i} + Q_{\mathrm{L}i} \end{bmatrix}$为注入的有功和无功功率，$i=1$，…，$n$；$I_{\mathrm{g}i} = \begin{bmatrix} I_{\mathrm{d}i} \\ I_{\mathrm{g}i} \end{bmatrix}$为发电机参考坐标下的机端电流，$i=1$，…，$m$；$u = \begin{bmatrix} p_{\mathrm{M}i} \\ V_{\mathrm{ref},i} \\ V_{\mathrm{o}i} \end{bmatrix}$分别对应第 i 个发电机的期望有功功率、第 i 个发电机母线上的期望电压（$i=1$，2，…，m）、变压器分接头 i 处节点所控制的期望电压（$i=1$，2，…，p）；p_{L}为负荷参数向量。

如果考虑到整个模型，则在 x_{F} 中会出现静态无功补偿（SVC）控制和感应电动机的状态变量。在下面的例子中给出了 m 个发电机、n 条线路以及带有 p 个有载调压变压器的系统方程，其中只包括同步电机和变压器分接头的动态变化。

4.4　电压稳定性评估技术

现在我们讨论不同的电压稳定方法：VIPI 方法、奇异值分解法、雅克比矩阵条件数法和能量裕度方法。图 4.4 给出了这些技术的描述。

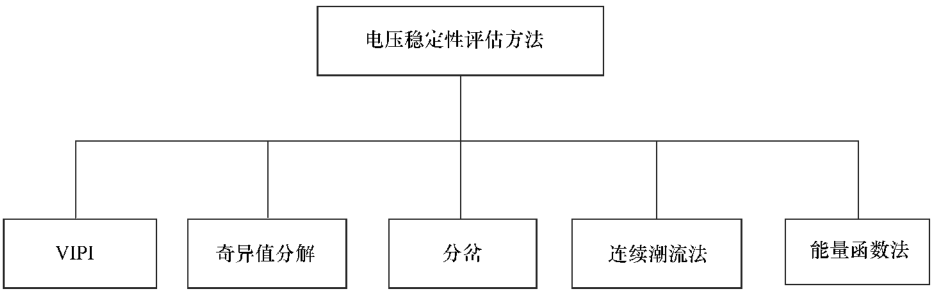


图 4.4　电压稳定评估方法

VIPI 方法：VIPI 是由 Tamura 等人基于潮流多解的概念发展而来的[12]。根据参考文献［12］，潮流解 x_1 和 x_2 可以由下面的两个向量 a 和 b 来表示：

$$x_1 = a + b$$
$$x_2 = a - b$$

这等价于

$$a = \frac{x_1 + x_2}{2}$$

$$b = \frac{x_1 - x_2}{2}$$

式中，x_1 是一般的（高电压的）潮流解；x_2 是对应的低电压潮流解；a 是节点电压空间的奇异向量；b 是同一空间的边界向量。

再定义两个向量 Y_s 和 $Y(a)$，称为节点状态空间的奇异向量。在图 4.5 中给出了这些向量之间的关系。

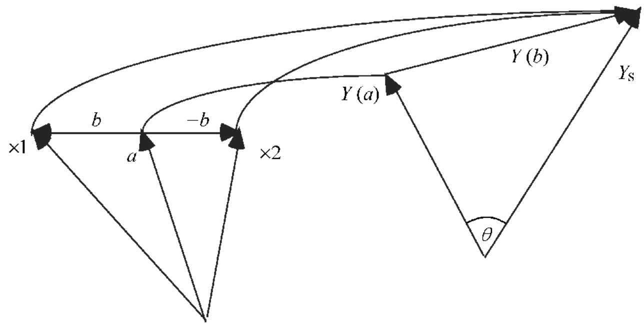


图 4.5　节点状态相量空间中 VIPI 的概念

由下面的方程来定义 VIPI：

$$\text{VIPI} = \cos^{-1}\left(\frac{Y_s^{\mathrm{T}} \times Y(a)}{\|Y_s\| \times \|Y(a)\|}\right)$$

式中，向量 Y_s 为与 x_1 有关的节点注入，但 PV 节点中相应的无功功率注入值是使用电压幅值的平方值来代替的；$Y(a)$ 为与向量 a 有关的节点注入；$\|x\|$ 是向量 x 的 l_2 范式。

只要能够得到相关的低电压潮流解，VIPI 就很容易计算。参考文献［1］和［5］中分别给出了用来确定电力系统低电压潮流解的详细和简化方法。一般而言，对于实际电网，要找到所有相关的低电压潮流解是非常困难的。

最小奇异值：当系统运行状态接近崩溃点时，系统潮流方程的雅克比矩阵 J 会接近于奇异。雅克比矩阵的最小奇异值大小代表着雅克比矩阵的奇异程度。奇异值分解法可用于求解静态电压稳定性分析中的最小奇异值。

根据奇异值分解理论，潮流的雅克比矩阵可分解为

$$J = U\Sigma V^{\mathrm{T}}$$

式中，$J \in R^{2n\times 2n}$是潮流的雅克比矩阵；$\Sigma = \mathrm{Diag}(\sigma_1, \sigma_2, \cdots, \sigma_n)$，$\sigma_{\max} = \sigma_1 \geqslant \sigma_2 \geqslant \cdots \geqslant \sigma_n = \sigma_{\min} \geqslant 0$。

如果矩阵 J 的秩为 $r(r\leqslant 2n)$，那么奇异值大小是 $A^{\mathrm{T}}A$ 或 AA^{T}正的奇异值的平方根，U 和 V 都是 $2n$ 阶的标准正交矩阵，它们的列分别包括 $A^{\mathrm{T}}A$ 或 AA^{T}的特征值。因此

$$AV_i = \sigma_i u_i$$

$$A^{\mathrm{T}}u_i = \sigma_i V_i$$

继而可定义

$$E_j = u_j V_j^{\mathrm{T}}$$

方程可以被改写为

$$J = \sigma_1 E_1 + \sigma_2 E_2 + \cdots + \sigma_n E_n$$

如果令

$$J' = \sigma_1 E_1 + \sigma_2 E_2 + \cdots + \sigma_{n-1} E_{n-1}$$

考虑到矩阵 J 的 l_2形式，J'是秩为 $n-1$ 的矩阵，并且最近似于秩为 n 的矩阵 J。也就是说，矩阵最小奇异值可以用来衡量矩阵 J 和 J'间的接近程度。功率潮流方程的最小奇异值给出了雅克比矩阵奇异值的大致范围，并能被用作静态电压稳定性的指标。

雅克比矩阵的条件数：在数值分析中，求解线性方程 $Ax=b$ 的变量 x 时可以使用条件数来计算矩阵 A 或者向量 b 的误差所带来的传递误差。如果矩阵 A 是病态的，那么即使向量 b 或 A 有很小的变化，也会使得解向量 x 有较大的变化。

对于线性化的潮流方程，可以运用雅克比矩阵的条件数来判断它的病态情况，以及是否向量 b 或者 A 的微小变化都会给解向量 x 带来很大的影响。例如，可以判断负荷的微小变化是否会给节点电压带来较大改变。如果条件数超出指定的范围，那么可判定当前的运行状态就接近于电压崩溃点。

可以定义线性系统解向量对矩阵 A 或者向量 b 的敏感程度为

$$Cond_2(\boldsymbol{J}) = \frac{(\max\ \text{stretch of}\ \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})^{\frac{1}{2}}}{(\min\ \text{stretch of}\ \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})^{\frac{1}{2}}}$$

如果矩阵 A 是对称的，特征值为 σ_1，σ_2，$\cdots$，σ_n，那么矩阵的条件数可以表示为

$$Cond_2(\boldsymbol{A}) = \frac{\max|\sigma_i|}{\min|\sigma_i|}$$

对于潮流雅克比矩阵 J，条件数能够给出矩阵 J 及其转置的病态条件。条件数

小（1～10）意味着雅克比矩阵的病态状况较好（电压稳定裕度较大）；条件数大（>100）意味着其运行状态更接近雅克比矩阵的奇异点，并且电压稳定裕度较小。极端情况意味着 J 是奇异的，而其条件数无穷大。因此，条件数 $Cond_2(J)$ 能够用来判断从运行状态到电压崩溃点的大致范围。

4.5 电压稳定性指标

经过大量研究，已经提出了很多从某一运行状态到崩溃点接近程度的指标。可以将潮流雅克比矩阵的退化作为电力系统静态稳定性的一个指标。在某些情况下，参数连续变化过程中雅克比矩阵行列式的符号改变，将意味着线性化后摇摆方程的实特征值越过虚数轴进入复数面的右半部分，将失去稳定性。有些作者指出，当特征值实部穿过虚数轴的个数为偶数时，雅克比矩阵符号的改变可能也不会意味着稳定性的丢失。电压稳定性和潮流多解有关。

VCPI 指标是针对节点、区域或是整个系统的，可以认为是发电机产生的无功功率增量对给定无功负载增量的比。不同的指标参数（L 指标）一般是由潮流解通过适当计算得到的。可以将雅克比矩阵的最小奇异值作为电压安全性的指标，其中最小奇异值的幅值和雅克比矩阵的病态程度以及电压崩溃点的接近程度之间是相互等价的。基于类似概念，也可以使用雅克比条件数作为电压失稳指标。

可以使用分岔理论来分析系统的静态稳定性和电压崩溃问题。系统潮流方程的静态分岔与发散型失稳或失去因果关系是有关联的。静态稳定性的充分必要条件是基于潮流映射可行性区域以及可行性裕度等概念的，但是计算代价较大。也可使用一个含有电压变化和无功负载的系统模型的能量函数，来推导出一个用来评估系统对于电压崩溃脆弱性的方法。目前的结论是，应用能量方法的关键在于能够找到合适的Ⅰ型低电压解。

除了以上直接计算稳定性指标的方法外，一些间接方法比如连续方法或者最优化方法，都已经发展并用于计算电压崩溃的精确点。在使用连续方法时，需要给出不同的关于负荷变化模式的假设。

总体来讲，静态电压的不稳定性分析方法是基于潮流多解（VIPI，能量方法）、潮流结果（L 指标，VCPI）以及雅克比矩阵的特征值（最小奇异值和条件数）的。如果能够通过研究动态电压崩溃来进行控制策略的设计（离线应用），那么静态电压稳定性分析能够给运行人员提供从当前运行点到崩溃点的接近程度的大致信息。因此，这时一个能够给出接近崩溃点的预警信息的指标是很有意义的。

当系统负荷增加时，可以由正切向量来得到对应每一个节点电压的增量。因此，确定和电压稳定性极限相关的最弱节点方法是找到节点中值 $\mathrm{d}V_i/\mathrm{d}P_{\mathrm{total}}$ 最大的节点，其中 $\mathrm{d}P_{\mathrm{total}}$ 是整个系统有功负荷的增量，并定义为

$$\mathrm{d}P_{\text{total}} = \sum_n \mathrm{d}P_{L_i} = \left(S_{\Delta\text{BASE}} \sum_n K_{L_i}\cos(\psi_i)\right)\mathrm{d}\lambda = C\mathrm{d}\lambda$$

因此最弱节点 j 为

$$\left|\frac{\mathrm{d}V_j}{C\mathrm{d}\lambda}\right| = \max\left[\left|\frac{\mathrm{d}V_1}{C\mathrm{d}\lambda}\right|, \left|\frac{\mathrm{d}V_2}{C\mathrm{d}\lambda}\right|, \cdots, \left|\frac{\mathrm{d}V_n}{C\mathrm{d}\lambda}\right|\right]$$

当最弱节点 j 达到稳态时，电压稳定极限 $\mathrm{d}\lambda$ 接近于 0，比率 $|\mathrm{d}V_j/C\mathrm{d}\lambda|$ 会变得无穷大，或者与其等价的比率 $|C\mathrm{d}\lambda/\mathrm{d}V_j|$ 会趋向于 0。在数值上后一个比率更容易求解，并且为整个系统提出了很好的电压稳定性指标。用 $\mathrm{d}Q_{\text{total}}$ 代替 $\mathrm{d}P_{\text{total}}$，同样可以得到很好的应用。

国际大电网委员会（CIGRE）工作组将这些指标分为基于给定的运行状态点以及基于负荷裕度两种。基于负荷裕度的指标解释了发电机当前运行极限的非连续性。根据系统能够承受的负荷或传输功率增量，进而确定了从运行点到最大功率传输点的 MW/Mvar 差值和临界情况。

基于潮流解或者真实的系统运行点可以给出运行状态的指标。无功备用是一个简单而重要的指标，可以用来表示系统的安全性。

确定直流系统指标的方法是不同的。可以通过计算指标 $\Delta V = \sum_{i=1}^{n} V_i - V_{\text{ref}}$，其中 V_i 是节点 i 处的电压，V_{ref} 是节点参考电压，并选择一个阈值作为安全指标。

模态或特征值分析方法类似于灵敏度分析，但是模态分解却能够给出更多信息。牛顿-拉夫逊方法的系统分块矩阵方程可以改写为

$$\begin{bmatrix}\Delta P \\ \Delta Q\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P_\theta} & J_{P_V} \\ J_{Q_\theta} & J_{Q_\theta}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\theta \\ \Delta V\end{bmatrix}$$

式中，分块雅克比矩阵反映了含有更完善设备模型的潮流解。设 $\Delta P = 0$，我们记 $\Delta Q = [J_{Q_V} - J_{Q_\theta} J_{P_\theta}^{-1} J_{P_V}]\Delta V = J_R \Delta V$，其中 J_R 是系统降阶后的雅克比矩阵。J_R 直接关联着节点电压幅值和节点无功功率注入。

令 λ_i 为矩阵 J_R 的第 i 个特征值，ξ_i 和 η_i 分别为相应的右列和左行特征值。第 i 个模态无功功率变化量为 $\Delta Q_{mi} = K_i \xi_i$，其中 $K_i^2 \sum_j \xi_{ji}^2 = 1$，$\xi_{ji}$ 是 ξ_i 的第 j 个元素。相应的第 i 个模态电压变化量为

$$\Delta V_{mi} = \frac{1}{\lambda_i}\Delta Q_{mi}$$

每一个特征值 λ_i 的幅值决定了所对应模态电压的脆弱性。λ_i 幅值越小，相应的模态电压就越脆弱。如果 $\lambda_i = 0$，那么第 i 个模态就会发生电压崩溃，因为模态功率的任何变化都会引起模态电压的无限大变化。

如果所有的特征值都是正数，那么就可以认为系统是电压稳定的。当特征值带有负实部并且保持稳定时系统便会呈现出不同的动态过程。将节点特征值与 Q-V

灵敏度关联起来可以很好地解释系统电压稳定性与矩阵 J_R 特征值之间的关系。我们认为 J_R 是对称矩阵，那么 J_R 的特征值就接近纯实数。如果所有的特征值都是正数，J_R 正定，并且 V-Q 灵敏度也是正数，这就意味着系统是电压稳定的。

如果系统中至少一个特征值是正数，那么可以判断系统是电压不稳定的。矩阵 J_R 的特征值为零，意味着系统处于电压不稳定的临界状态。更进一步讲，矩阵 J_R 的最小的特征值便决定了系统与电压不稳定状态的接近程度。可以定义节点 k 到节点 i 的参与因子为

$$P_{Ki} = \xi_{ki}\eta_{ik}$$

对于所有较小的特征值，节点参与因子决定了其接近电压不稳定区域的程度，除了节点参与因子之外，模态分析也计算了支路和发电机的参与因子。支路参与因子解释了在某个稳定模式下哪些支路是重要的。这可以用来帮助我们找到控制措施以及能够导致失去电压稳定性的故障形式。发电机参与因子用来指明在某个稳定模式下哪些同步发电机必须留有无功功率储备。

对于含有几千个节点的系统，计算所有的特征值是不现实也是没有必要的。但是仅仅通过计算矩阵 J_R 的最小特征值也是不充分的，因为在系统的不同部分通常会有不止一个节点性能较差，并且对于重负荷系统，和最小特征值相关的节点不一定是最容易出问题的节点。矩阵 J_R 的 m 个最小特征值对应着系统 m 个最不稳定的节点。如果 m 个特征值中最大的一个，如节点 m 是足够稳定的，那么就可以忽略那些没有计算到的点，因为我们可以认为它们比节点 m 更稳定。可以通过使用一种隐式的反平衡联立迭代技术来计算矩阵 J_R 的 m 个最小特征值以及相关的右和左特征值。

类似于灵敏度分析，模态分析只对线性化后的模型有效。例如，模态分析可以用于研究 P-V 曲线上的点或者动态仿真中的实时点。

4.6 静态电压稳定性研究中的分析技术

早期电压崩溃的研究主要是考虑稳态下的电压响应。一般认为电压崩溃是由于超出传输极限而产生的问题。电网的传输极限是指系统从电源到负荷区域传输的最大有功功率或者无功功率。具体地讲，传输极限是指对应至少一种潮流解的最大传输功率。从我们熟知的 PV 和 QV 曲线中可以观察到，随着传输功率的增加，电压会随之降低。当超出最大功率传输极限时，潮流解也就不存在，这意味着系统失去了稳态平衡点。从分析角度看，可以使用潮流雅克比矩阵的奇异点来检测电压的崩溃点。

电网的稳态运行可以通过潮流方程给出：

$$F(\theta, V, \lambda) = 0$$

式中，θ 为节点电压相角向量；V 为节点电压幅值向量。λ 是一个我们期望能改变

的参数。总体来说，F 的维数应该是 $2n_1+n_2$，其中 n_1 和 n_2 分别为 PQ 和 PV 节点的数量。

需要强调的是，对于电压失稳而言，潮流雅可比矩阵 $\partial F/\partial x$ 奇异是必要但不充分条件。在很大程度上，文献中所提出的用于观测电压不稳定的方法和潮流求解方法中因非线性引起的潮流多解是有关系的。这种方法的缺陷是它依赖于潮流分析中的牛顿-拉夫逊方法，该方法在电压稳定性极限附近这是极不可靠的。

4.6.1　用于检测电压崩溃点的直接法

通过这种方法试图找到 λ 的最大允许变化范围，也就是 $F(x,\lambda)=0$ 的运行点 (x^*,λ^*)，并且满足在这一点上雅克比矩阵是奇异的。它需要求解下面的方程：

$$G(y)=\begin{bmatrix}F(x,\lambda)\\ F_x^{\mathrm{T}}(x,\lambda)h\\ h_k-1\end{bmatrix}=0$$

这个过程基本上是通过 $F_{\mathrm{x}}(x,\lambda)h=0$ 来增广潮流方程 $F(x,\lambda)=0$，其中 λ 为 $h_k=1$ 的 n 维向量。这种方法的缺陷是：

1）要求解的非线性方程的维数是常规潮流方程的两倍；

2）这种方法需要对向量 λ 做出很好的初值估计。

优点是如果初始运行点接近转折点，那么直接法就能很快收敛。扩展后的系统需要求解 4 个 $n\times n$ 线性系统［n 是雅可比 $F_x(x,\lambda)$的维数］。

4.6.2　非直接法（连续方法）

假设 $F(x,\lambda)=0$ 的第一个解 (x_0,λ_0) 是可行的，那么下面的问题就是进一步计算解 (x_1,λ_1)，(x_2,λ_2)，直到达到目标点，记为 $\lambda=\lambda^*$。第 i 步是从 (x_i,λ_i) 的附近开始来试图计算下一个解，但有一个中间步骤。预测并修正下一步，每一步 $i\to i+1$ 被分成两个部分。第一部分试图预测出一个解，第二部分试图使得预测的部分收敛于所需要的解：

预测器：$(x_i,\lambda_i)\to(\bar{x}_{i+1},\bar{\lambda}_{i+1})$

校正器：$(\bar{x}_{i+1},\bar{\lambda}_{i+1})\to(x_{i+1},\lambda_{i+1})$

连续法在预测器的选择、参数化策略的类型、校正器的方法类型和步长控制等方面是有所不同的。

参数化：在 (x,λ) 空间内必须对曲线形成的解分支进行参数化。参数化是一种确定分支上解的数学方法。有各种不同的参数化方法。例如，观察 PV 曲线可以看出随着负载增加，电压是连续降低的。因此，在某一些节点上允许电压幅值有小幅度改变，并且对于每一个给定的电压值都可以找到一个潮流解。这里，为满足方程其负荷参数可取任意所需值。这称为局部参数化策略。在局部参数化中可以通过

一个式子来增广原方程，并获取状态变量的值。方程中可以描述为

$$\begin{bmatrix} F(y) \\ y_k - \eta \end{bmatrix} = 0, \quad y = \begin{bmatrix} \theta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix}$$

式中，η 是 y 第 k 个元素的设定值。一旦选定合适的指标值 k 和 η，那么就可以使用一个修正牛顿-拉夫逊潮流方法来求解（只有在含有一个额外方程和一个额外状态变量的情况）。进而使得校正器能够满足前面所讨论的预测解。

以下给出一个描述静态分析过程的简单例子。

4.7　电压稳定性的应用与实施示例

考虑下面方程中所定义的潮流方程。向量函数 F 含有 n 个标量方程，并定义了 $n+1$ 维(x, λ)区域的曲线。连续法主要是针对这条曲线的轨迹而言的。对于前面的解(x, λ)，为了便于图形表示，我们需要 x 的一维表示方法。常用的方法有：

1）$|x| = \sum_{i=1}^{n} x_i^2$（欧氏范数的平方）；

2）$|x| = \max\limits_{i=1,n} |x_i|$（最大范数）；

3）$|x| = x_k$。

通常电力系统使用方法3）。在图4.6 中，当 $\lambda = \lambda^*$ 时，我们有一个极为重要

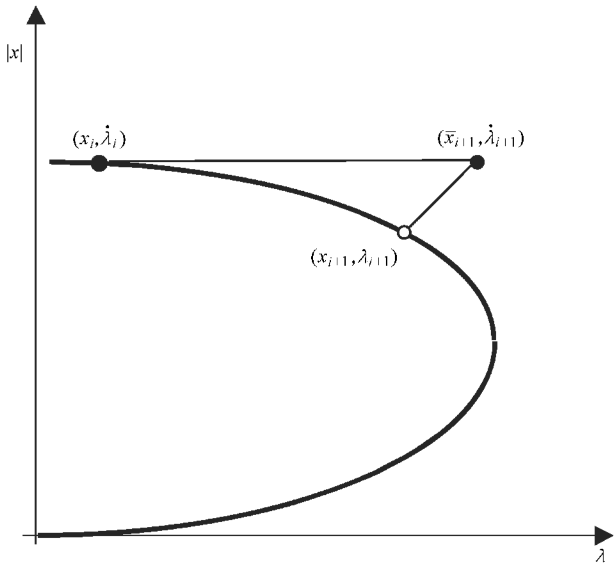


图4.6　包括预测-修正步骤的曲线

的解，当 $\lambda > \lambda^*$ 时，是无解的；当 $\lambda < \lambda^*$ 时，可以得到两个解（高电压解和低电压解）；当 λ 接近 λ^* ($\lambda < \lambda^*$)时，两个解合并在一起。在这一点上潮流方程的雅克比矩阵是奇异的。数学中称这些点为拐点，或者转折点。拐点的代数特征是可以通过 F_x给出的：

1）当秩小于 n 时，$F_x(x^*, \lambda^*)$是奇异的；

2）$F_x(x^*, \lambda^*)/F_\lambda(x^*, \lambda^*)$满秩时为 n，并且满足一些非退化条件。

用于计算这些点的方法主要有直接法和间接法。

4.8　通过电压稳定的预防控制实现稳定性约束优化

可控的无功功率电源主要包括发电机、并联电抗器、并联电容器以及有载调压变压器（OLTC）。发电机能够调节励磁以发出或者吸收无功功率。当处于过励磁时，它们会发出无功功率；当欠励磁时，它们会吸收无功功率。发电机的自动电压调节器能够连续调节励磁。电抗、并联电容器和 OLTC 都是通过接收运行人员命令并经由传统的断路器来实现开断功能的。自从 20 世纪 80 年代早期，电力系统柔性交流输电系统（FACTS）控制器的改进对于改善电压已经得到了一些应用。图 4.7 描述了一个控制方案。

最常用的设备是无功功率控制器（RPC）和静止无功补偿器（SVC）。通过检测基波电压和电流的相角差，RPC 会自动将电容器组接入或者断开。将相角差与设置的相差分区表做比较，来确定电容器的投切。作为更加先进的电子设备，SVC 可以为系统提供连续的容性和感性无功功率。曲型的 SVC 包括晶闸管调节电抗器（TCR）、晶闸管投切电容器（TSC）和交流滤波器（ACF）。从系统运行的角度来看，SVC 和可控的电抗器以及固定的电容器都是等价的。为了维持机端电压在某一个等级水平，其输出会随着系统对无功功率的需求而变化。RPC 和 SVC 都需要进一步的研究。由于仅仅是在局部区域使用，系统中的无功功率电源必须相互协调以维持电压稳定性。因此含有 DSOPF 动态的最优潮流是有必要的。

在进行运行规划时，需要对一系列动态干扰事故进行评估，分析其是否稳定，以及稳定程序如何，目的是比较不同的运行方案，并确定在可用稳定边界内系统的最大输送能力。由于各自不同的机理与时间尺度，暂态稳定和电压稳定一度被认为是解耦现象。但事实上，它们应被视作一种耦合短期电力系统动态[21]。研究人员已经使用能量函数法来快速判断某个暂态扰动是否会导致系统失稳。单个暂态稳定评估方法的计算速度是很快的，但运行规划人员往往会从多个时间尺度进行仿真，并将结果综合为一个单一的、易于理解的数字，即能量边界（EM）。

为了使输电和配电系统更加可靠，需要网络变得更加智能。在过去的几年中，已经采取了相当多的行动来完善智能电网。智能电网的构想是使用现有的电压稳定

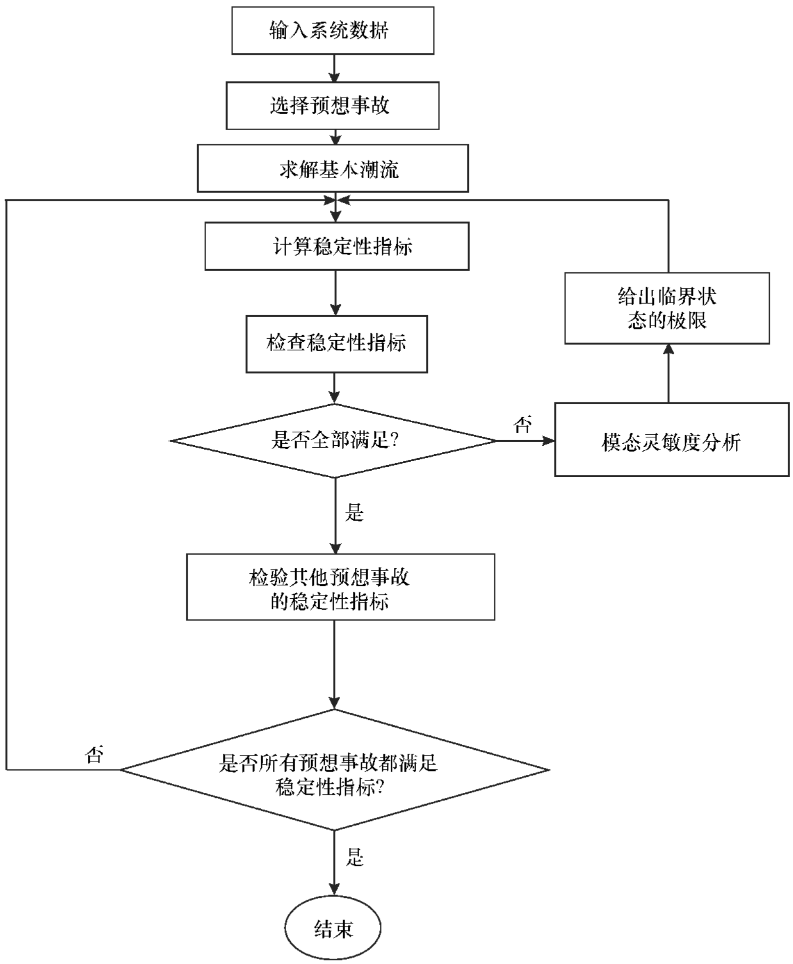


图 4.7　电网电压不稳定防控流程图

性技术改造智能化电网，使之具备状态感知能力并创造出更为友好的运行环境。之前的大停电和网络的可靠性是系统运行人员主要关心的问题。DSOPF 的特点是能够帮助开发新的 OPF 方法，并且其约束为动态 OPF，进而求解性能指标以及在不同控制情况下实时协调新的优化器 DSOPF 的性能，建立如下模型：

1）获取负荷和发电机的特性，评价实时数据的作用。

2）考虑到负荷和发电机的随机性，研究并优化负荷和发电机之间的最小不平衡问题。

3）设计包含最优潮流工具的优化器，其约束为随机空间内的发电机输出。

4）设计计算智能算法或者使用经典最优化组合方法来解决设计问题。

5）根据动态规划概念，利用方案优先级列表来对负荷-电源平衡指数进行排序。

4.9　功角稳定性评估

即使只是单一故障的研究，对于一个具有 500 个节点、100 台机组的电力系统而言，其暂态稳定性研究也至少需要 1h 的运行时间。因此，稳定性评估的直接法，如基于李雅普诺夫或能量函数法，是很有效的选择方案。应该指出的是，暂态稳定性研究通常不仅仅是研究干扰发生后同步发电机能否保持同步的问题，因为对于研究动态系统的行为性能来说，暂态分析具有更为一般的目的。暂态阶段主要感兴趣的是机电暂态，通常会持续几秒的过程。如果要考虑持续的振荡或者特殊的控制行为问题时，应该选择一个更长的暂态周期来研究。图 4. 8 中给出了求解该问题的可选方案。

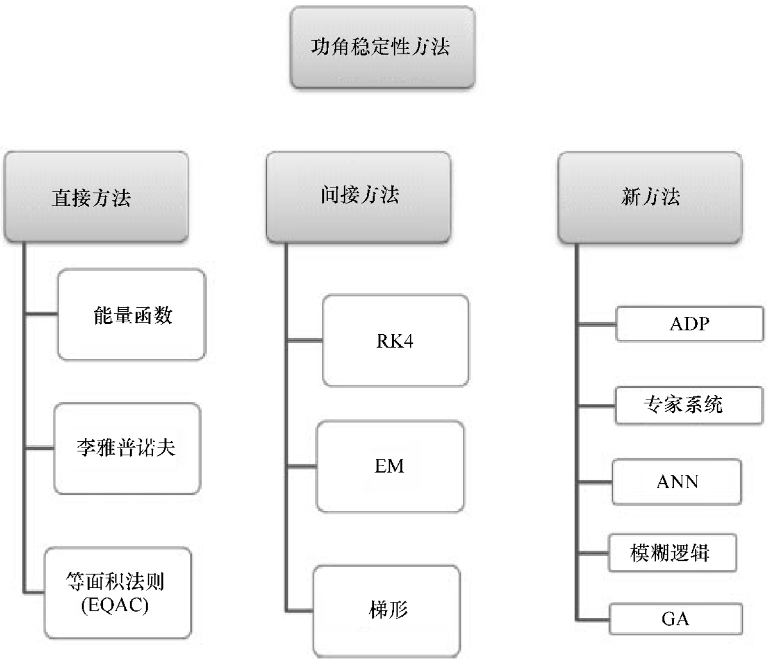


图 4. 8　功角稳定性方法概述

在实际电网运行中，参数和负载条件与之前规划阶段所假设的条件是有很大差别的。因此，为保证故障状态和可能发生的异常状况下电力系统的安全性，需要系统运行人员提前对各种预想事故进行模拟，在必要情况下可以采取预防控制措施并估计可能产生的结果。这里的方程为

$$Md^2\delta/dt^2 = P_m - P_e$$

在状态空间中可以改写为

$$d\delta/dt = f(\delta, u)$$

$$d^2\delta/dt^2 = 加速度$$

式中，δ 为角度；u 为控制（电力系统的发电机控制等）；P_m和 P_e分别为机械功率和电功率。为解决时域稳定性问题，可以使用基于预测和校正过程的数值方法并能给出更进一步的建议，包括：

1）数值方法：RK4、梯形方法、改进的 Euler 方法、θ 方法。Euler 方法将微分方程从数字转为模拟形式；数值方法是通过对解耦的一阶和二阶状态微分方程进行分析并结合预测校正技术来求解数值问题；对于恒定不变的网络，梯形方法比其他方法会更快速。所有的技术都有相似之处，表现在以下方面：网络初始状态、步长选择以及方法的综合使用。

尽管现如今这些方法仍在使用，但它们在鲁棒性、可扩展性、随机性、预测性以及对于未来电网的自适应能力方面仍然有欠缺，并且这对于当前电力系统而言是完全缺失的。

2）人工智能方法。这种技术分别使用启发式和计算智能来评估稳定裕度和指标。其方法主要包括事故分类专家系统，确定并评估不稳定性裕度等。

基于网络的特点和对评估不稳定性起作用的参数类型，通常使用人工神经元网络来分类不同情形的稳定程度。其他的人工智能方法包括粒子群优化、遗传算法。这些方法可用于给电网中的固有和随机因素建模。很多文献验证了这些技术。它们奠定了可用来确定并评估实时状态下功角稳定性的指标的方法基础。

在过去几年的研究中稳定性分析的重要技术是动态安全性评估。和其他方法不同的是，这类技术能够利用实时量测数据，因而非常有用。

3）动态安全性评估（Dynamic Security Assessment，DSA）和智能电网下实时稳定评估。DSA 考虑了在不同故障下根据发电设备和网络结构来研究电力系统的振荡。为了对突发故障的影响进行评估和分类，基于线路或机组故障影响的能量边界评估包括计算机组相对于参考机组（或 COA）的势能与动能。为了确定网络影响并能够进行分类排序，需将动能和势能集成于一个给定的阈值。

4.9.1 暂态稳定性

考虑由常微分方程所描述的自治系统：

$$\dot{x} = F(x)$$

式中，$x = x(t)$；$F(x)$为 n 维向量。$F(x)$是 x 的非线性函数。李雅普诺夫意义上的稳定性是指平衡状态。定义平衡状态为状态 x_e下对于所有的时间 t 而言 $x(t)$ 保持不变，即$\dot{x}_e = F(x_e) = 0$。由于 $F(x)$不是 t 的显函数，解 x_e代表一个固定的状态。

为简单起见，任何非零的 x_e 都被变换到原点（$x=0$）处。也就是说，用 $x+x_e$ 代替 x，可以得到

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}(x+x_e)=F(x+x_e)=f(x)$$

可以导出

$$\dot{x}=F(x)$$

需注意上式中的 x 与之前相差 x_e。从后面的定义可以看出，这种变换并不影响系统的稳定性。因此，原点始终是平衡状态。需注意 t 可能为包括时间在内的任何独立变量。

令 $a=\mathrm{d}^2\delta/\mathrm{d}t^2$ 表示系统的加速度，开始时 $a<0$，且在 P_m 线上，故障清除后 $a>0$ 且在 P_m 线下。这里有两个角度，分别对应零加速度时的 $\delta_s=\sin^{-1}P_m/A(X_c)$ 以及 $\delta_u=\pi-\delta_s$。由于加速度在不断减小，在 $\omega=0$ 时 δ 从 δ_0 增加至 $\delta_m<\delta_u$，并且在这一点上速度 ω 为 0。由于 δ_m 处加速度为负值，因此 δ 开始减小直至相角小于 δ_s，此时机组速度为 0，然后由于 $a>0$ 会再恢复回来。从而功角会在 δ_s 附近来回摇摆。由于 δ_u 是无法达到的（ω 是虚构的），因此这是在 δ_u 处 $E-\nabla<0$ 的例子。

然而，故障清除后会导致产生较大的 A_1，这使得 δ 在 $\omega\geqslant0$ 下超过 δ_u。然后，由于 $a>0$，δ 会进一步增加并且不再恢复。这是 $E-\nabla\geqslant0$ 的例子。因此，如果功角在 δ_s 附近摇摆，那么是暂态稳定的，否则就是暂态不稳定。根据这种定义也可以运用其他方法来评估稳定性，比如下面的暂态能量函数法（TEF）：

（a）如果 δ_u 处 $E-\nabla<0$，那么是暂态稳定的，幅值越大其稳定性就越好。

（b）如果 δ_u 处 $E-\nabla\geqslant0$，那么是暂态不稳定的。

4.9.2　应用于实际电力系统的稳定性分析

由于对实际电力系统使用直接法非常困难，因此有必要做出一定的简化假设。到目前为止，大部分分析过程会被限制在特定的电力系统模型中，比如发电机采用经典模型并且负载采用恒阻抗模型。最近的研究更多在于采用更详细的负载模型。

在一个多机电力系统中，能量函数 E 描述了干扰后整个系统的暂态能量，如下所示：

$$\nabla=-\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}J_i\omega_i^2-\sum_{i=1}^{n}P'_{mi}(\theta_i-\theta_i^s)-\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\left[C_{ij}(\cos\theta_{ij}-\cos\theta_{ij}^s)-\int_{\theta_i^s+\theta_j^s}^{\theta_i+\theta_j}D_{ij}\cos\theta_{ij}\mathrm{d}(\theta_i+\theta_j)\right]$$

式中，θ_i^s 为干扰后稳定平衡点（SEP）节点 i 的功角；$J_i=2H_i\omega_0$ 为第 i 个发电机的标幺转动惯量。

暂态能量函数主要包括以下四个部分：

1） $\frac{1}{2}\sum J_i\omega_i^2$：COI 参考坐标系下所有发电机转子动能的变化量。

2） $\sum P'_{mi}(\theta_i-\theta_i^s)$：所有发电机转子相对于 COI 的势能的变化量。

3） $\sum\sum C_{ij}(\cos\theta_{ij}-\cos\theta_{ij}^s)$：所有支路存储的磁场能的变化量。

4） $\sum\sum\int D_{ij}\cos\theta_{ij}\mathrm{d}(\theta_i+\theta_j)$：所有支路耗散能量的变化量。

第 1 项为动能（E_{ke}），仅是发电机速度的函数。第 2、3、4 项的和为势能（E_{pe}），仅是发电机相角的函数。

评估的过程包括三步：

步骤 1：计算临界能量 V_{cr}。

步骤 2：计算故障清除时刻系统的总能量 E_{cl}。

步骤 3：计算稳定性指标：$V_{cr}-V_{cl}$，如果稳定性指标为正，那么可认为系统是稳定的。

在故障清除时刻进行时域仿真，获取所有发电机的功角和速度。使用这些来计算故障清除时系统的全部能量 V_{cl}。图 4.9 给出了利用 TEF 进行暂态稳定性分析的过程。

4.9.3 稳定区域的边界

在应用 TEF 方法时最困难的一步是计算稳定的边界值 V_{cr}。这里简单介绍三种不同的方法。

最近不稳定平衡点（UEP）**方法**。在应用 TEF 方法进行暂态稳定性分析的早期文献中，主要使用下面的方法来确定最小的 E_{cr}。

步骤 1：通过求解扰动后系统的稳态方程（考虑不同的节点角度初始值），来确定所有的 UEP。

步骤 2：对步骤 1 获得的所有 UEP，计算系统的势能；在 UEP 处系统给出了临界能量 V_{cr}，这使得势能最小。

由于这种方法假设发生了最严重的故障，从而来计算临界能量，因此计算出来的结果是保守的。

主导 UEP 算法。由于最接近 UEP 方法带来的保守性问题，其结果通常缺少实用价值。主导 UEP 方法依据故障以及临界能量的计算来解决保守性。这种方法是基于观察到一个事实：即所有临界稳定的轨迹接近于和系统分离边界紧密相关的 UEP 点。称这些 UEP 为主导或相关 UEP。

Chiang 给出的主导 UEP 方法[6, 7]，其本质是通过主导 UEP 以及恒值能量曲面去近似由故障时轨线导向的相关稳定边界部分（主导 UEP 的稳定流形）。

对于起始于点 $p\in A(x_S)$及满足 $V(p)<V(\hat{x})$的任何故障轨迹 $x_f(t)$，如果故障轨

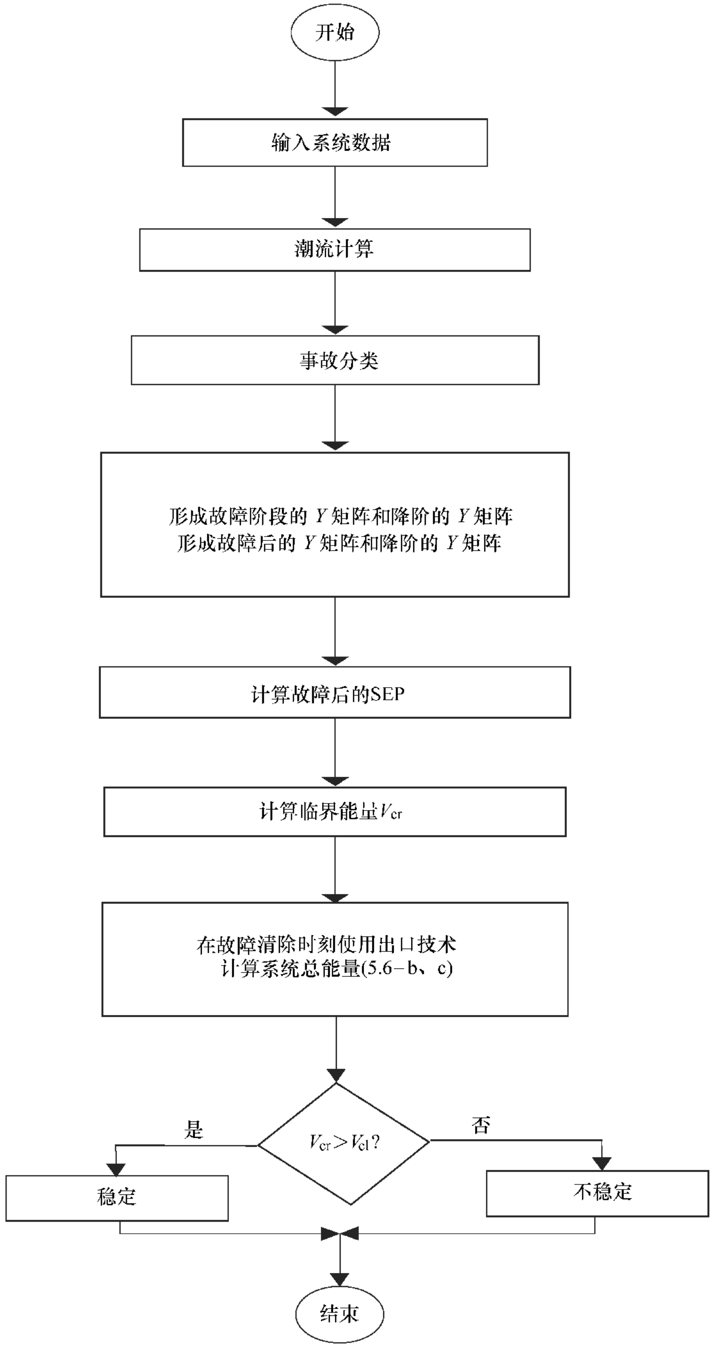


图 4.9　暂态稳定分析的 TEF 流程图

迹的出口点位于 $\hat{x}$ 的稳定域内，那么故障轨迹在经过 $\hat{x}$ 的稳定域 $W^S(\hat{x})$之前必会穿过关联恒值能量曲面$\partial V_c(\hat{x})$（从而离开稳定性边界$\partial A(\hat{x}_S)$）。因此，关联恒值能量曲面$\partial V_c(\hat{x})$能够用来估计故障轨迹 $x_f(t)$的稳定性边界部分$\partial A(\hat{x}_S)$。计算过程可以分为四步：

1）确定主导 UEP 中故障轨迹 $x_f(t)$上的 x_{co}。

2）设置临界能量 V_{cr}并作为主导 UEP 处能量函数 $V(\cdot)$的值，也就是 $V_{cr}=V(x_{co})$。

3）在故障清除时刻 t_{cl}处使用故障轨迹 $V_f=V(x_f(t_{cl}))$来计算能量函数 $E(\cdot)$的值。

4）如果 $V_f<V_{cr}$，那么故障后系统是稳定的，否则是不稳定的。

关键在于如何找到故障轨迹的主导 UEP。关于主导 UEP 方法的近期研究主要是集中在启发式算法和仿真上。在下一节将讨论如何为带有转移电抗 G_{ij}的经典电力系统模型找到主导 UEP 的算法理论。

能量函数形式如下：

$$
\begin{aligned}
V(\delta,\omega) = \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} \Bigg\{ & \left(\frac{1}{2M_T}M_iM_j(\omega_{in}-\omega_{jn})\right)^2 \\
& -\frac{1}{M_T}(P_iM_j-P_jM_i)(\delta_{in}-\delta_{jn}-\delta_{in}^S+\delta_{jn}^S) \\
& -V_iV_jB_{ij}\{\cos(\delta_{in}-\delta_{jn})-\cos(\delta_{in}^S-\delta_{jn}^S)\} \\
& -V_iV_jG_{ij}\frac{\delta_{in}+\delta_{jn}-(\delta_{in}^S+\delta_{jn}^S)}{\delta_{in}-\delta_{jn}-(\delta_{in}^S-\delta_{jn}^S)}\{\sin(\delta_{in}-\delta_{jn})-\sin(\delta_{in}^S-\delta_{jn}^S)\}\Bigg\} \\
= {} & V_p(\delta)+\frac{1}{2M_T}\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=1}^{n}M_iM_j(\omega_{in}-\omega_{jn})^2
\end{aligned}
$$

式中，$M_T=\sum_{i=1}^{n}M_i$；$x^S=(\delta^S,0)$是研究的稳定平衡点（SEP）。注意到 $V(\delta,\omega)$代表能量边界，而 V_i和 V_j是网络内的节点电压。

4.9.4 主导 UEP 搜索算法

降阶后的系统为

$$
\dot{\delta}_{in}=\frac{1}{M_i}(P_i-P_{ei})-\frac{M_i}{M_n}(P_n-P_{en})=f_i(\delta),i=1,2,\cdots,n-1
$$

寻找主导 UEP 的算法主要包括 5 个步骤：

步骤 1：通过故障轨迹$(\delta(t),\omega(t))$，检测到 δ^* 点，在该点处 $\delta(t)$轨迹投影能够到达 $V_p(\cdot)$的第一个局部最大值，然后沿着 $\delta(t)$计算在 δ^* 点前面一步的点

δ^-，以及 δ^* 点后面一步的点 δ^+。

步骤 2：使用点 δ^* 作为初始条件，并且对故障后的降阶系统方程进行积分来找到 $\sum_{i=1}^{n} |f_i(\delta)|$ 的第一个局部最小值，也就是 $\delta_0{}^*$。

步骤 3：使用 δ^- 和 δ^+ 作为初始条件，并重复步骤 2 来找到相应的点，分别为 δ_0^- 和 δ_0^+。

步骤 4：对比 $|f(\delta)|$ 在 δ_0^-、δ_0^* 和 δ_0^+ 处的值，并取其最小值作为初始估计值来求解上述降阶系统方程，$f_i(\delta)=0$，将解记为 δ_{co}。

步骤 5：故障轨迹的主导 UEP 即是 $(\delta_{co}, 0)$。

4.9.5　智能电网 DSA 设计中的过程变化

现在我们给出智能电网中可能选择的 DSA 设计方案。

选择 1：当前一些研究人员最常使用的是带有 PMU 的实时 DSA 方法，但是我们提出了一种修正原有系统拓扑结构的方法，并分 3 步来实时标记出包含或不包含可再生能源的电力系统新的拓扑结构：

步骤 1：建立一种基于不同参数变化下进行稳定性评估的计算机指标。

步骤 2：在某时间间隔内使用某种形式的概率函数来建立一种新的事故排序步骤。

步骤 3：为了给出下一次的修正或者预防措施，需要确定不稳定性和稳定性的边界。

选择 2：在第 2 种选择中，采用随机变量表示系统元件、设备以及负荷的波动性。为此，需要进行概率计算。发电机模型采用可再生能源混合模型（部分是确定的，部分是随机的）。每一个模型都需要一些相关的概率密度函数来表示。现在我们可以认为这种动态方程是随机过程，其结果是由平均值和方差形式给出的。然后我们引入反函数计算来给出算法的边界状态，其结果也能反映随机性与波动性题。图 4.10 给出了其过程。

三个步骤为：

1）设计带有变时间积分来完成关于 $\delta(t)$ 的函数 P 的值。

2）分析算法或微分方程的耦合问题。

3）解释结果并显示。

选择 3：在适当的概率分布函数下研究含有波动性可再生能源和随机负载的随机方程的建立以及微分方程的耦合过程。如前所述，在每一个步长，利用计算智能与人工神经元网络对可控电源以及可再生能源的出力进行预测，可以对系统的不稳定性做出预估。

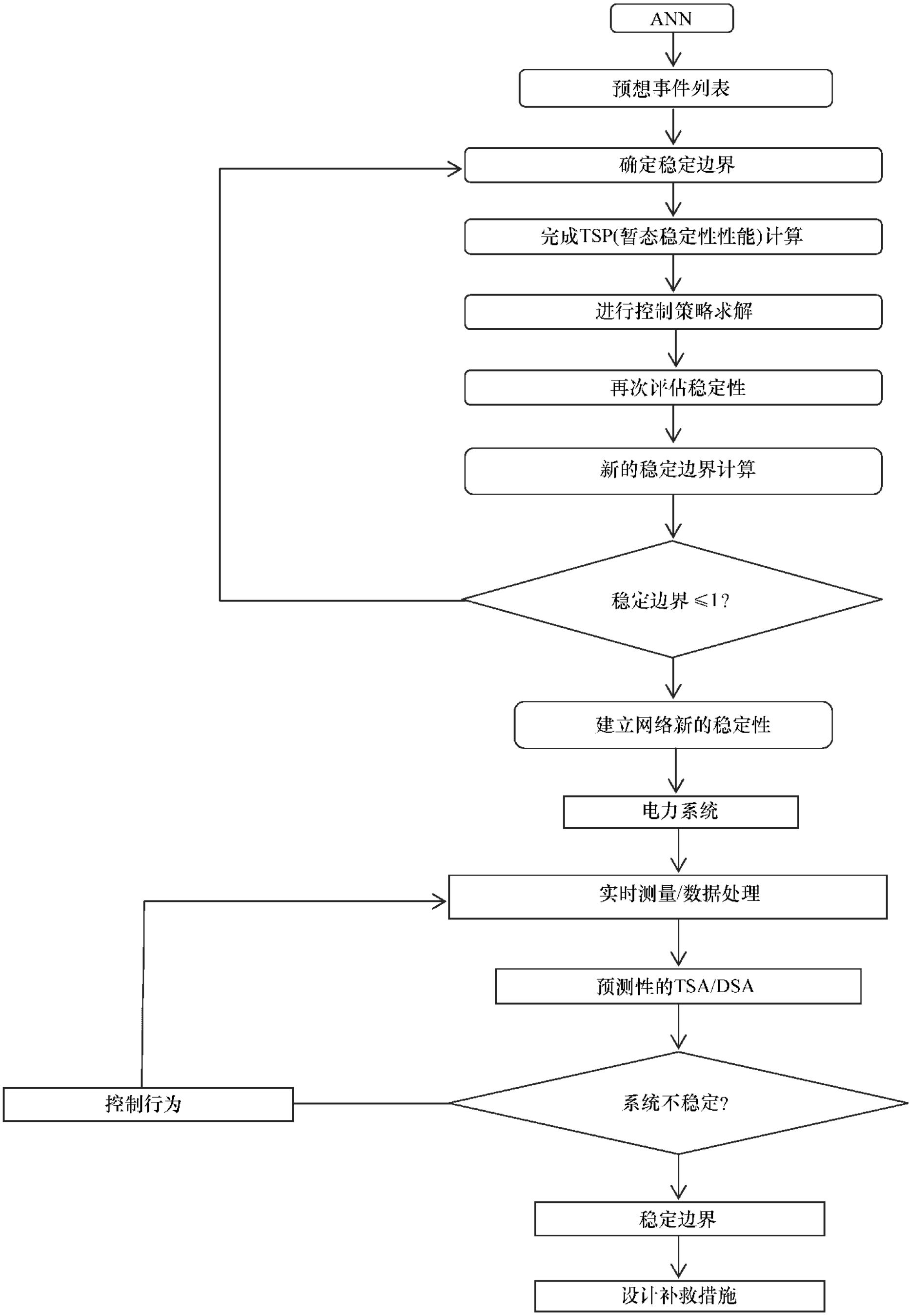


图 4.10 智能电网 DSA

4.10　状态估计

能量管理系统（EMS）实时计算并维持在最小成本下的运行安全性问题。电力系统量测为状态估计（SE）程序的处理和分析提供了相关信息。状态估计的功能主要包括收集断路器和隔离开关的数据并对拓扑信息进行处理。通过加权最小二乘法（WLS）来得到所有节点处电压和相角的状态估计。通过网络参数、变压器分接头、并联电容器和断路器信息进行不准确数据的检测。一般所讨论的状态估计模型都是基于稳态函数的。目前使用的众多算法主要存在如下问题：

1）收敛性问题：如果电力系统状态改变的速度比 SCADA 数据的刷新速度快时，传统的状态估计可能会不收敛。

2）通信通道存在丢失一些重要数据的可能性。

3）系统参数数据会存在许多错误。

4）系统参数或设备，例如断路器、分接头或者隔离开关的变化。

在实际中由于难于确定拓扑结构的变化，因而很难得到状态估计值，这是因为状态估计是基于网络拓扑结构和节点导纳阵的，可能无法得到可逆的 Y 矩阵。当存在拓扑错误（不正确的开关状态）时，显式的开关建模有利于坏数据的分析。在这种情况下，网络中的一部分直接用物理开关设备表示，允许包含零阻抗支路和开关设备的量测值。节点电压和相角的常规状态是通过使用新的状态变量来讨论的。将可观性分析拓宽到部分节点的电压和开关设备的潮流中去；如果它们的值可以通过已有的量测值来计算，那么就被认为其是可观的。对于一个零阻抗支路或闭合的开关，状态估计[14]中给出了以下的约束条件和伪量测量：

$$V_k - V_m = 0 \quad 和 \quad \theta_{km} = \theta_k - \theta_m = 0$$

在这种情况下，P_{km} 和 Q_{km} 被用做额外的状态变量，并且与复数节点电压 $V_k e^{j\theta_k}$ 和 $V_k e^{j\theta_m}$ 相互独立，这是由于欧姆定律（复数形式）不能够用来计算以这些电压为变量的支路电流函数。

对于断开的开关（$z_{km} = \infty$），状态估计中也存在同样的额外状态变量。

在开关状态未知的情况中不需要增添伪量测量。开关设备出现的不正确状态会影响状态估计的收敛性。在这些情况下，最好是把这些状态当成未知的，然后完成状态估计过程，在理想状态下这样可以含有准确的状态估计值。

可以将上述思想应用到含有未知阻抗的支路中[11]。支路阻抗 z_{km} 是未知的，然而为了简化可以假设所有和 k、m 相连的支路阻抗都是已知的。由于零阻抗支路以及断路器闭合/断开状态的存在，不能够使用欧姆定律联系与节点 k、m 相关联的状态变量 $V_k e^{j\theta_k}$、$V_k e^{j\theta_m}$ 和支路复功率潮流 $P_{km} + jQ_{km}$、$P_{mk} + jQ_{mk}$。这些潮流可以用

作额外状态变量，由于它们是因限制条件 $I_{km}+I_{mk}=0$ 连接在一起的，所以它们之间不是相互独立的，这可以由下面的两个伪量测量来解释：

$$P_{km}V_{\mathrm{m}}+(P_{mk}\cos\theta_{km}-Q_{mk}\sin\theta_{km})V_k=0$$

$$Q_{km}V_{\mathrm{m}}+(P_{mk}\sin\theta_{km}+Q_{mk}\cos\theta_{km})V_k=0$$

节点 k 处的注入功率量测值可以表述为潮流状态变量 P_{km}、Q_{km} 以及和 k 相关联的其他所有支路潮流的总和。因为只有正常支路的潮流才是节点状态变量的函数，所以量测模型不会含有阻抗的未知部分。类似地，可以分析节点处的注入功率测量和阻抗未知支路中的潮流测量。一旦估计了网络状态，那么未知参数的值也可以由估计值来计算。

对于复杂的网络元件，例如传输线路的 π 型等效模型，除了潮流状态变量外还需要考虑到其他的约束条件（伪量测量）。例如，要考虑 π 型等效模型的串联支路阻抗，这是需要做出估计的。在这种情况下，可以认为潮流值 P_{km}、Q_{km}、P_{mk} 和 Q_{mk} 是额外的状态变量。其次，终端潮流 P_{km}、Q_{km}、P_{mk} 和 Q_{mk} 也可以表示为新的状态变量，而不再是终端电压的函数。这样，在量测模型中不会出现支路串联阻抗，可以改写为

$$P_{km}=P_{kk}+P'_{km}\quad 和\quad Q_{km}=Q_{kk}+Q'_{km}$$

$$P_{mk}=P_{mm}+P'_{mk}\quad 和\quad Q_{mk}=Q_{mm}+Q'_{mk}$$

注意到在这些等式中，潮流 P_{kk}、Q_{kk}、P_{mm} 和 Q_{mm} 通常写成关联参数的形式。与之前描述的相同，节点 k 及 m 处的注入量测值可以表示为终端功率潮流的形式。这些增加的状态变量并不相互独立，因此有必要给出以下关系表达式：

$$P'_{km}V_m+(P'_{mk}\cos\theta_{km}-Q'_{mk}\sin\theta_{km})V_k=0$$

$$Q'_{km}V_m+(P'_{mk}\sin\theta_{km}+Q'_{mk}\cos\theta_{km})V_k=0$$

联系 π 型平衡模型中状态变量的约束条件是 $y_{kk}^{\mathrm{th}}=y_{mm}^{\mathrm{th}}$。描述与有功和无功功率潮流相关的关联导纳需服从于两个约束：

$$P_{kk}V_m^2-P_{mm}V_k^2=0$$

$$Q_{kk}V_m^2-Q_{mm}V_k^2=0$$

静态状态估计指的是使用在线数据（通过周期性遥测来上传给控制中心）进行基态潮流求解的过程。如果每一个系统都有在线状态估计，那么就为系统外部等值所需的相邻系统间的数据交换提供了便利。为了完成在线事故分析，需要给出外部网络等值模型。如果没有外部网络等值模型，那么在线状态估计会局限在电压、相角、线路潮流和网络拓扑结构的观测上。

在潮流中输入/负荷变量描述了系统的稳态行为。在实际系统中，由于负荷都是大量分布式的，因此并不是总能够实现对这些输入和负荷量的直接测量。传输线上的潮流量测则需要很少的仪表，并且对于潮流的求解有很大的影响。原则上讲，可以测量任何有意义的系统量，并且将这些量测值作为系统方程的输入，从而解出状态变量的值（节点电压幅值和相角）。通过状态变量的估计我们可以得到节点注入值。

4.10.1　加权最小二乘法估计的数学公式

由于存在冗余的量测值，可以通过使加权最小二乘法（WLS）的性能指标 J 最小化来获得 x 的解估计 $\hat{x}$：

$$J = [z - h(x,p)]^{\mathrm{T}} R^{-1} [z - h(x,p)]$$

假设向量 p 是精确已知的，我们可以从以上表达中消去 p。状态估计问题变为：给定 $z = h(x) + v$，$E(v) = 0$，$E(vv^{\mathrm{T}}) = R$，计算 x 的最优估计值 $\hat{x}$ 使下式取最小值：

$$J = [z - h(x)]^{\mathrm{T}} R^{-1} [z - h(x)]$$

在 J 的最小值处应有 $\left.\frac{\partial J}{\partial x}\right|_{\hat{x}} = 0$。其中 $\hat{x}$ 是对应 J 最小值的状态向量，并且是 x 的最优估计值。根据 J 的上述定义，上述零梯度条件将导出 n 维向量方程：

$$0 = H^{\mathrm{T}}(\hat{x}) R^{-1} (z - h(\hat{x}))$$

上式是一系列的非线性代数方程，这需要采用迭代方法求解，即在状态变量 x 值附近需要使用牛顿-拉夫逊方法来线性化系统方程。

状态估计输出的统计学特性。最优估计向量 $\hat{x}$ 的期望值是 $E(\hat{x}) = x$。此外，$\hat{x}$ 的协方差矩阵是

$$\mathrm{cov}(\hat{x})[H^{\mathrm{T}} R^{-1} H]^{-1}$$

J/m 的期望值是一个很有意义的指标，它可用于评价估计值与真实测量值的匹配程度：

$$E(J/m) = \frac{m-n}{n}$$

当 $m = n$（即没有量测冗余）时，$E(J/m) = 0$，估计值可以非常完美地匹配量测值。当 $m \to \infty$（即无限冗余时），$E(J/m) \to 1$，估计值接近于真实测量值。除此之外，指标 J^t/m 的期望值可用于评价估计值与含噪声的量测值的匹配度：

$$E(J^t/m) = n/m。$$

当 $m = n$ 时，我们得到 $E(J^t/m) = 1$；当 $m \to \infty$ 时，有 $E(J^t/m) = 0$；而当 $m \to 0$ 时，$E(J^t/m)$ 无定义。

广义上讲，指标 J 是 $m-n$ 自由度的卡方分布。

4.10.2　坏数据的检测和辨识

冗余的量测信息允许我们辨识并具体定位出不良数据，这包括明显的错误或严重的建模错误，例如错误的网络拓扑结构，或者较大的参数错误。没有冗余时估计值能够很好地匹配数据，但却无法进行坏数据辨识。若有冗余，WLS 算法会尽力最小化性能指标 J（或者 J_p）。当无坏数据或错误参数时，J/m 的期望值是 $(m-n)/m$。这样我们可以使用一种快速的方法来判断数据是否在设定的错误范围内。如果 $\frac{J}{m} \gg \frac{m-n}{m}$，我们可以断定这中间存在错误。这时，我们就需要利用不良数据辨识来找出坏数据。导致问题的 4 种原因是：

1）严重的量测错误；

2）小的建模错误；

3）小的参数错误；

4）关于量测误差分布的不准确信息。

在实际情况中（尤其是在初步实施阶段），上述问题可能同时发生。当出现多个不良数据时，解决问题的要点包括两个方面：

1）挖掘潮流方程的结构特征，分析不良数据之间的相关性；

2）创造性地进行假设检验。

为使不良数据辨识功能可用，还需一些额外考虑。这可以通过两步来实现，如下面所述的预估计和后估计分析。

4.10.3　预估计分析

在取得一组量测断面后，要对 WLS 算法中的系统向量 z 做进一步处理。处理方法是进行一系列所谓的一致性测试，并以下列为目标：

1）明显错误量测值的检测；

2）明显错误网络拓扑结构的检测；

3）将数据分类为（a）有用、（b）可疑、（c）生数据；

4）调整量测值的方差。

现针对一些问题讨论如下。

明显错误量测值的检测。在本预处理阶段，超出合理限额值的量测数据被自动丢弃。例如，设置线路潮流极限为线路理论传输容量的 2 倍。类似地，功率因数、电压等级等都可以限制在安全范围内。在大多数情况下，大部分坏数据都属于这一类，并可被快速剔除。

明显错误网络拓扑结构的检测。正常情况下，特定的网络接线分析程序根据断路器状态信息形成网络拓扑。在将网络模型送给状态估计程序之前，断开的线路需从模型中删去。也就是说，在状态估计所用的模型中，所有线路都必需是闭合

（充电）的。但是，可能存在断路器闭合而隔离开关打开的情况。此时，如果隔离开关状态漏报，则线路可能被误认为带电。一种检测办法是看线路两端潮流是否都为 0，若是，则线路极有可能断开。根据所分析系统的不同，还有其他一些利用量测数据检测拓扑错误的方法。

生数据的分类。由于潮流方程的结构特点，可以采用一系列的一致性假设检验条件来判断大部分数据的有效性，并对量测值方差进行调整。例如：

1）线路两端测量的潮流：对于真实的潮流而言，两端的潮流幅值差异只会随着线损值而变化，线损可以用下式评估：

$$T_{\text{Loss}} = T_{ij} + T_{ji} = g_{ij}(V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos(\delta_i - \delta_j)) \approx V_i^2 g_{ij}(T_{ij}/b_{ij})^2$$

因此，我们得到 $T_{ij} + T_{ji} - T_{\text{Loss}} = e_{ij}$，其中 e_{ij}为误差，其方差约等于线路两端潮流量测值方差的和。如果比率$\dfrac{e_{ij}^2}{\sigma_{T_{ij}}^2 + \sigma_{T_{ji}}^2} \leqslant 9.0$，那么认为两个量测值是一致的。这可以有大约 97% 的概率保证，两端量测值的综合误差都小于限值。

2）线路两端的无功、有功潮流量测值，以及一端的电压量测值：利用这些信息可比较有功、无功潮流的计算值与量测值，从而很容易验证量测值的一致性。

3）母线注入以及本端或对端线路潮流的量测值：利用母线注入等于相关线路潮流之和这个特征，可以实现快速一致性检查。

4）局部估计估计：将整个网络分为一系列小的可观性网络，可进行快速的状态估计计算，并检验坏数据的可能位置。

5）伪量测值：系统中有些节点的净注入功率为 0，因而无需装设量测仪表。可以将这些零注入节点提取出来，将其零注入功率作为伪量测用于状态估计，由此带来的误差极小。或者，修改基于加权最小二乘法的最优化公式，使之考虑由伪量测引入的等值约束。无论哪种方式，伪量测都自动被视作有效数据，并在状态估计中发挥作用。

我们现在讨论预估计分析的过程。

用 S_i表示上述特定问题的一致性检测中所使用的量测值集合。令 a_i^2 和 e_i^2 分别为与检测有关的总方差和误差平方。令 a^2 为一致性阈值，因此若 $e_i^2 > a^2$，那么集合 S_i中的量测值存在不一致性，否则就是一致的。如果量测值是一致的，那么就可以认为它们是有效的。如果检测发现了不一致性，那么 S_i中只有那些之前没有被证实的量测值才会被认为是可疑的。如果通过这个过程，S_i中确定仅含有一个可疑的量测值，那么这个量测值便被视作坏数据并被从量测向量中剔除。

图 4.11 给出了预估计分析的整个方框图。在分析结束时，每一个量测值都被分为生数据、有效、可疑或是坏数据。只有坏数据才会被丢弃。对有效测量值的方

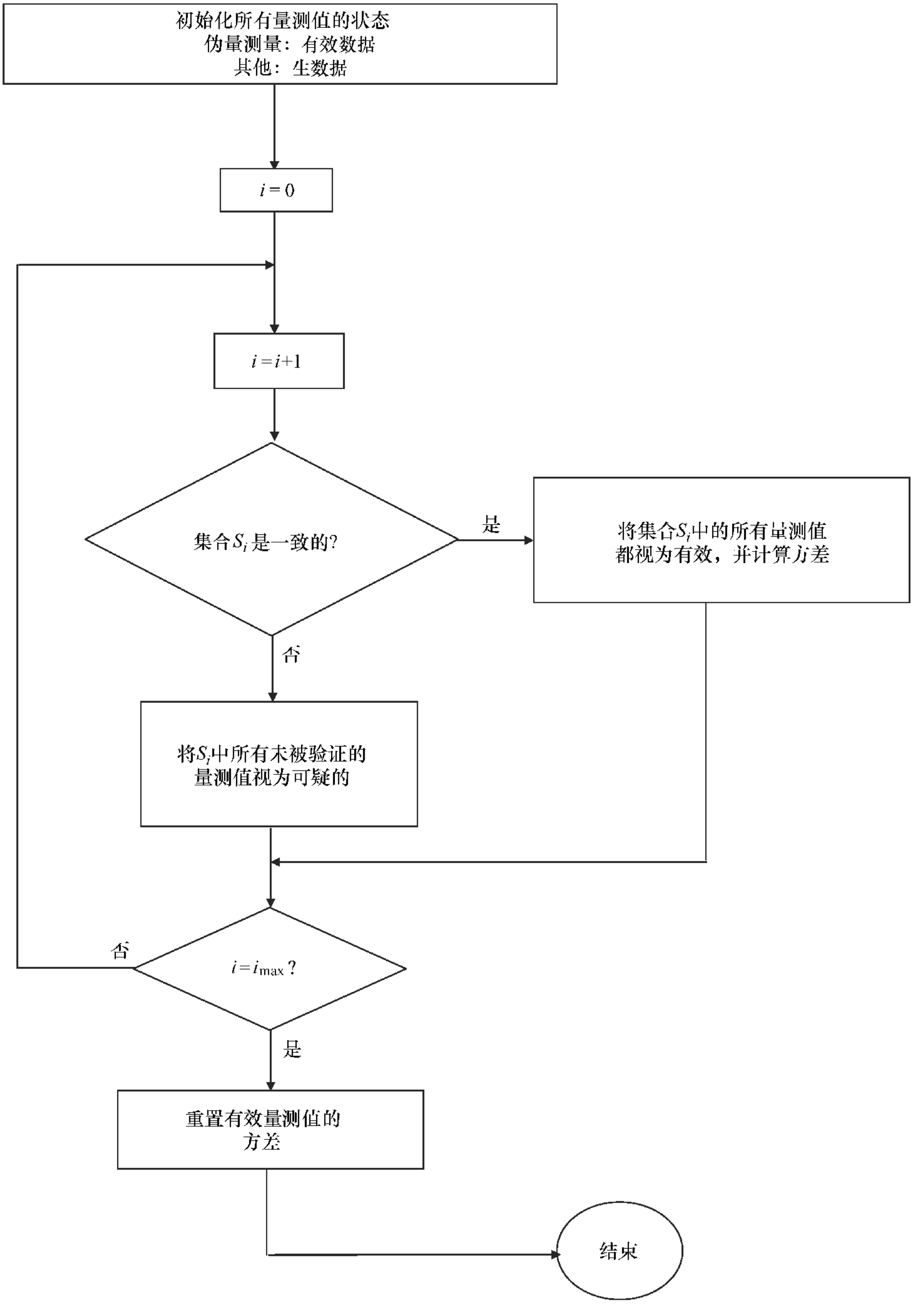


图 4.11　预估计分析流程图

差进行稍微修正，以反映一致性分析的结果。那些无法进行一致性检测的测量值则归为生数据，原因是它们不属于任何 S_i 集合，这往往是由于这部分数据无法提供冗余测量。最终，可疑量测中将包含尚未最终检出的坏数据，这将留待后估计分析阶段做继续处理。

4.10.4　后估计分析

后估计分析观察状态和参数估计的结果，并为导致性能变差的最可能原因建立假设。这是基于正则化残差分析的，其定义为：

$$r_i' = \frac{z_i - h(\hat{x},\hat{p})}{\rho_i},\quad i=1,\cdots,m$$

式中，$\rho_i^2 = \mathrm{var}(z_i - h_i(\hat{x},\ \hat{p}))$。

很显然，ρ_i^2是前面定义的协方差矩阵 S 的第 i 个对角元素。

从平均值上 $|r_i'| = 1.0$。从统计角度上来讲，$|r_i'|$有可能从 0 变化到 3。但这只是在所有数据都位于指定的统计精度内才会成立的。如果测量值或是参数中存在坏数据，那么一些正则化残差的绝对值就会超过了。许多情况下，最大的正则化残差对应的量测就是坏数据，但是这还没有得到数学上的证明。然而，我们可以得到，如果量测值 z_i是坏数据并且存在冗余量测时，它的正则化残差会很大。实际上，上述计算是很耗时的。因此，只要没有很大的信息丢失，可以将残差定义为 $r_i' = [z_i - h(\hat{x},\ \hat{p})]/\sigma_i$，$i=1$，…，$m$，以此代替上述定义的正则化残差。通常从平均值上 $r_i^2 \leqslant 1.0$。但是，当冗余的量测值中存在坏数据时会导致大的残差。

如参数无错误且不进行预估计分析，所有量测值都被分类为生数据。利用残差分析可进行假设检验，其过程是，首先删除残差最大的量测值并进行状态估计。如果结果不理想，则将其重新放回量测集，删除次大残差对应的量测值并再次执行状态估计，直至获得满意结果。显然，只有仅存在单个不良数据时才能成功识别坏数据。对于多个不良数据，这个过程可能失败。理论上，此时可尝试一次删除多个不良数据，然而，这种情况下计算时间就会开始变得特别不能接受。

确定单个不良数据点的假设检验：当参数值中含有噪声时，前述不良数据检测的效果会更差，原因是含噪声的参数自身就会导致大的残差。所以，必须先进行预估计分析和坏数据分析。这样，就可假设坏数据以很大概率存在于可疑量测集中（见图 4.12）。正常情况下，同一集合 S_i 中的可疑量测彼此间是强相关的，并且基本不受参数错误的影响。这样，我们就可形成图 4.13 所示的流程图。图中，在完成参数和状态估计后，每个一致性集 S_i 中具有最大不可接受残差的可疑量测即被视为坏数据。而先前被分类为可疑的量测，如其残差为可接受的小值，则被视为有用数据。这个过程需迭代数次，直至系统性能达到设定要求。

4.10.5　鲁棒状态估计

我们考虑一种状态估计方法，可以自动补偿坏数据带来的影响。其基本思想中

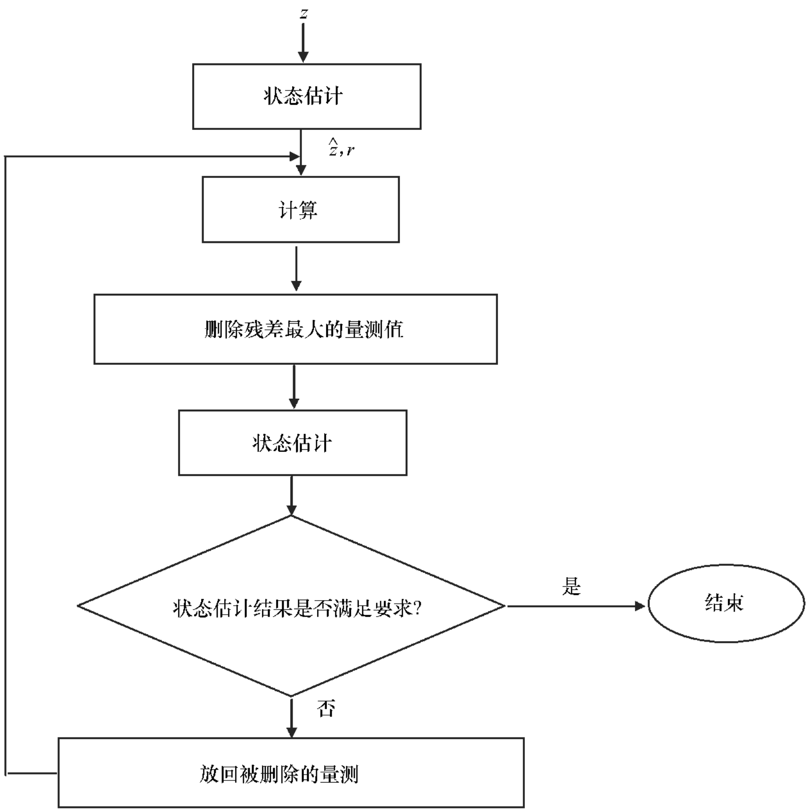


图 4.12　后估计分析的流程图

涉及 WLS 估计算法的拖尾效应。回顾一下 WLS 算法，如果量测中存在坏数据，那么其残差的影响可能扩散到整个系统中。为了说明这点，我们整理下 J 的公式：

$$
\begin{aligned}
J &= (z - h(\hat{x}))^{\mathrm{T}} R^{-1} (z - h(\hat{x})) \\
&= \sum_{i=1}^{m} \left(\frac{z_i - h_i(\hat{x})}{\sigma_i} \right)^2 \\
&= \sum_{i=1}^{m} (r_i)^2 \\
&= \sum_{i=1}^{m} J_i
\end{aligned}
$$

假设某一个 J 的 r_i 是错误的，那么它真实的误差方差会比假设的方差大很多。为了最小化指标 J，WLS 算法会试图使得每一个 J_i 都尽可能彼此相等。在鲁棒性估计中，J_i 的函数在原点附近区域内是二次函数，但随着残差 r_i 的变大而逐渐变得平

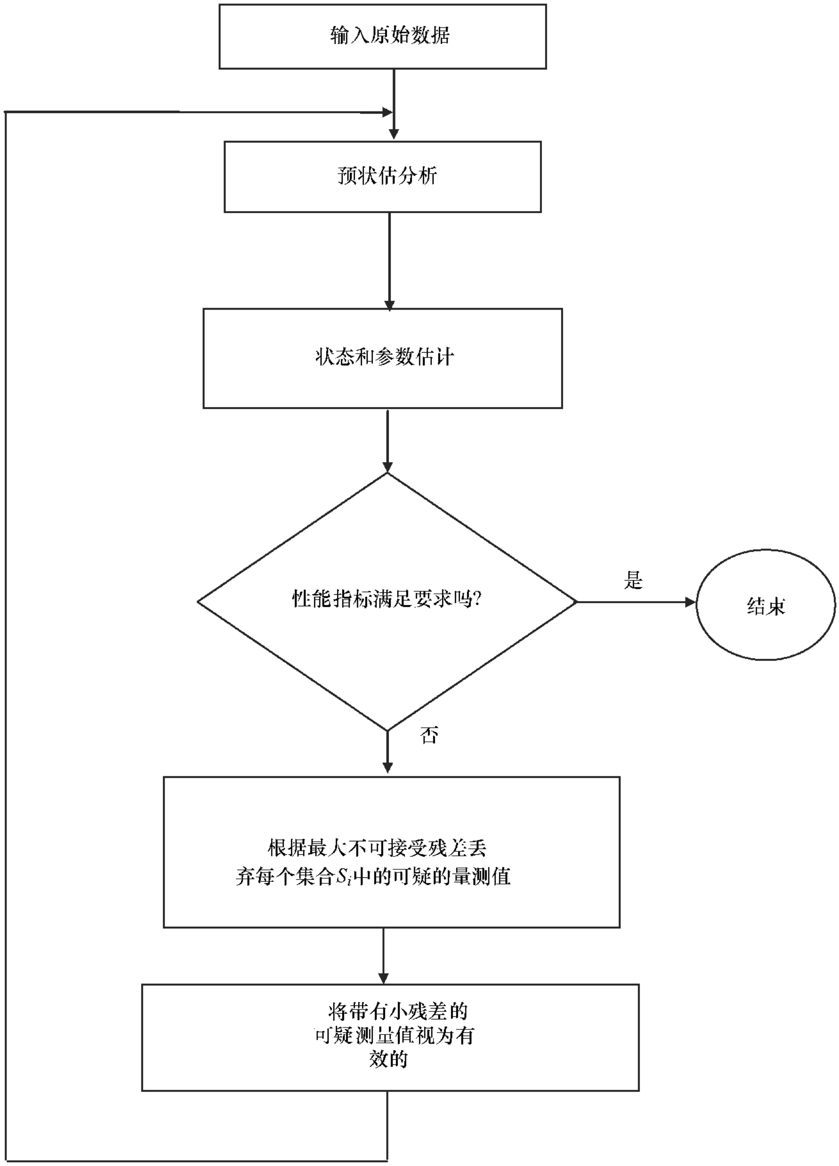


图 4.13　在线、状态、参数估计以及错误数据分析的整个流程图

坦。下面给出了 J_i的一个例子：

$$J_i = \begin{cases} r_i^2, & |r_i| \leqslant a \\ 4a^{\frac{3}{2}}|r_i|^{\frac{1}{2}} - 3a^2, & |r_i| \geqslant a \end{cases}$$

式中，a 是可变参数。在这个等式中，随着 r_i 变大，J_i 会以 $|r_i|^{1/2}$ 的速度增加。因此，较大的残差不会严重影响到估计过程。J_i 的上述形式是要求用 $\hat{x}$ 来最小化 J：

$$J = \sum_{i=1}^{m} J_i$$

最优化条件是

$$g(\hat{x}) = 0 = -\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{m}\frac{\partial J_i}{\partial x}\bigg|_{x=\hat{x}}$$

其中

$$\left(-\frac{1}{2}\right)\frac{\partial J_i}{\partial x} = \begin{cases} \dfrac{1}{\sigma_i}\dfrac{\partial h_i}{\partial x} r_i(x), & |r_i| \leqslant a \\ \dfrac{1}{\sigma_i}\left(\dfrac{a}{|r_i|}\right)^{\frac{3}{2}}\dfrac{\partial h_i}{\partial x} r_i(x), & |r_i| > a \end{cases}$$

从这里我们可以得到，如果 $|r_i| > 0$，那么第 i 个测量值的有效标准差是

$$\sigma_i' = \sigma_i \frac{|r_i|^{\frac{3}{2}}}{a}$$

也就是说，不良量测值会导致产生很大的误差偏差。和上述问题相关的矩阵可以表示为

$$F(x) = \sum_{i}^{m} F_i(x)$$

其中

$$F_i(x) = \begin{cases} \dfrac{1}{\sigma_i^2}\dfrac{\partial h_i}{\partial x}\left(\dfrac{\partial h_i}{\partial x}\right)^{\mathrm{T}}, & |r_i| \leqslant a \\ \dfrac{1}{\sigma_i^2}\left(\dfrac{a}{|r_i|}\right)^{\frac{3}{2}}\dfrac{\partial h_i}{\partial x}\left(\dfrac{\partial h_i}{\partial x}\right)^{\mathrm{T}}, & |r_i| > a \end{cases}$$

相应的迭代算法为

$$\hat{x}^{k+1} = \hat{x}^k + F^{-1}(\hat{x}^k) g(\hat{x}^k)$$

在预估计和后估计分析中，鲁棒性估计是十分有效的。基本上所有被证实的量测量都会有一个二次函数 J_i。只有可疑或是原始的量测值才会存在上述类型的 J_i 函数。通过将这个概念延伸到参数估计中，我们可以识别较大的参数错误。鲁棒的状态与参数估计需要利用预状态估计以剔除坏数据，其简化的流程图如图 4.14 所示。

4.10.6 智能电网环境下的状态估计

在未来智能电网状态估计的发展中，下述特性是非常重要的：

Abur 和 Zhao[17] 提出的基于 PMU 的状态估计应该包括下面步骤：

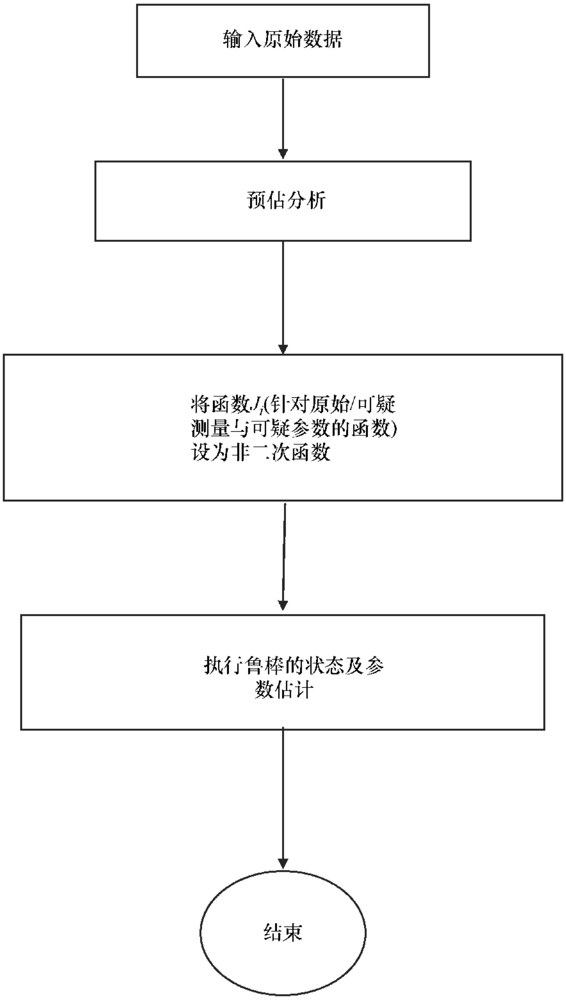


图 4.14　带有预估计分析的鲁棒性状态估计的流程图

a）获取 PMU 测量值并估计缓慢变化错误。

b）测量节点电压的幅值和相角（不需要估计相角）。

c）测量电流的幅值和相角。

d）在构造节点导纳矩阵时检测状态变化以减小误差。

e）直接计算变电站处的有功和无功功率潮流，或者直接使用电压和电流相量来计算有功、无功功率和视在功率。

在新的环境下，考虑到开放访问以及输电网运行中需遵守能源市场规则等可能性，电网的潮流分布将比传统体制下更不可预见。尽管可靠性仍是一个核心问题，但是由于需要在未来与现存的 EMS 中加入新的与能源市场相关的函数，因此能够

获得实时网络模型变得非常重要。这些模型基于状态估计结果，并用于各种网络应用，例如最优潮流、可用传输能力、电压和暂态稳定性等。Shirmohammadi 等[2]讨论了竞争能源市场中状态估计和其他先进分析功能的新作用。基于这些网络模型，运行人员能够判断他们的技术和经济决策，例如拥塞管理和辅助服务采购，并判别与电压和暂态稳定性有关的潜在运行问题[1]。

4.10.7 实时网络建模

通过实时测量与静态网络数据的综合来建立实时模型。实时测量包括模拟测量值和开关设备的状态，使得静态网络数据能与系统参数以及基本变电站结构相一致。因此，实时模型就是指在固定时间间隔上从状态估计结果抽取出来的当前网络状态的数学表达式。从理论上讲，状态估计应该以 2s 左右的扫描速度运行，但由于计算能力的限制，大多数实用的估计器都是以分钟级的速度或是直到发生重要变化时才会运行。

4.10.8 智能电网中状态估计实施方法

状态估计是一种重要的工具，可用于检测和诊断测量中的错误，比如网络错误或设备故障。这种技术用于估计因系统参数错误所带来的电压和潮流错误。为此，可将问题转化为一类含约束条件的最小化 $J(x)$ 问题，并使用直流或交流潮流求取最优解。其目标函数再次列写如下：$J=(x-x^*)R(x-x^*)$。

在求解上述最优化问题时，需关注如下问题：

1）算法的收敛性；

2）清晰的问题定义；

3）测量的时效性与数据质量。

对智能电网状态估计，研究人员有如下建议：

1）基于 PMU 的实时测量数据来应对可再生能源的接入以及随机性负荷。

2）将电网划分为多个区域，首先利用分布式状态估计对数据进行评估，然后再进行后续处理。

图 4.15 说明了如何利用 PMU 来改善状态估计的性能，方法是在传统状态估计的非线性迭代过程中增加一个利用相量量测的线性状态估计。这种方法需要识别状态估计中 PMU 的重要变化，最终结果表明，PMU 数据提供了对状态的直接评估，这显著简化了传统状态估计，并且不会改变现有状态估计的模型。变化可能主要存在于求解环节。例如，问题可以划分为两个子问题：一个仅仅是由 SCADA 量测值组成；而另一个则是由 PMU 和 SCADA 组成。第一个模型是使用传统的方法来求解，第二个则可以看做是局部的状态估计，它将系统分为多个局部可观测区域。在状态估计过程中，利用 WLS 方法，将 PMU 和 SCADA 量测结合起来构成混合状态估计，利用 PMU 量测来纠正局部状态变量。当 PMU 量测是可靠、精确时，可考虑去除局部状态估计。当系统中 PMU 数量足够多时，可直接利用 PMU 完成观测；否

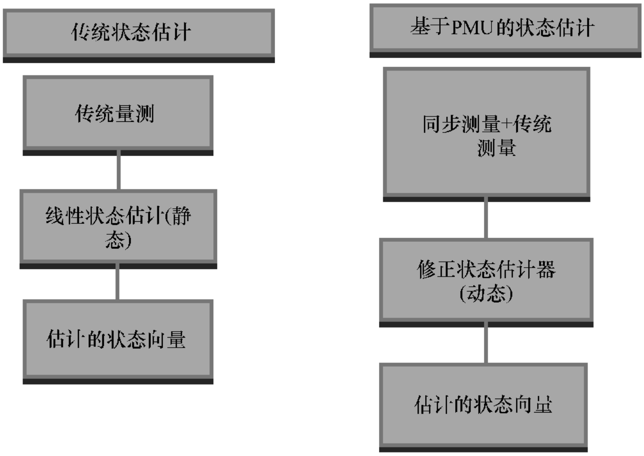


图 4.15　PMU 状态预估系统方案

则，就利用 PMU 来改善状态估计。

状态估计和 PMU 的联合能够为安全性评估提供新的数据集。考虑到系统的随机性，我们可以在数据分析中产生预测策略，并建议在实时控制中采用由状态估计改善的近似量测。

互联电网的可视化可用于垂直集成的电力公司、电源与独立系统调度机构中。理想情况下，控制中心所管辖的控制区域应是可观测的，但事实并非总是如此。例如，像一些低电压的子网络可能一直或暂时处于不可观测状态。另外，控制区域以外的网络通常是不可观测的，这能够通过直接计量或数据交换进而转换为可以观测的区域。

包含坏数据分析的完整状态估计可形成可观测的局部电网。利用负荷预测与发电计划，可构成伪量测量。通过增加伪量测量，可将状态估计的范围扩大到系统的其余部分。但在扩大的系统中执行状态估计时，要注意防止因遥测数据引起状态估计崩溃。

因此，状态估计可适用于建立网络的可观测部分模型，或者加入不可观测部分的模型。当具备足够的冗余量测时，状态估计可以消除坏数据的影响、允许暂时性的量测值丢失，而不会明显降低估计值的质量。状态估计虽能在一定程度上给出电网中无法直接量测部分的潮流，但其主要功能还是用于对冗余数据滤波、消除不正确量测并生成可靠的状态估计结果。利用状态估计功能形成高质量的网络实时模型，这不但对于事故分析、最优潮流、调度员培训仿真等传统应用是非常关键的，而且对于正在发展的能量市场中的新功能而言是更为迫切的[2]。

4.10.9　动态状态估计

状态估计的准确度非常重要，因为它为众多 EMS 功能提供输入，如电压/相角

稳定性分析、经济调度和安全性分析等。显然如今的电力系统正变得更加动态，因为负载和电源都会随着可再生能源的接入而变得更具随机性。为了处理这种变化，目前正在研究动态状态估计（DSE）技术。

DSE 采用了先进的数学方法对 k 时刻的状态进行估计，并对 $k+1$ 时刻的状态进行预估，同时给出预估误差。由于 DSE 能进行超前一步的状态预估，所以有助于运行人员做出更好的判断与决策。DSE 方法中，采用了 Holt 两参数指数平滑法用于状态预估，并使用扩展卡尔曼滤波法对预估状态进行滤波。直至今日，状态估计中所用的数据仍为通常的 SCADA 数据而非 PMU 数据，所以，系统精度不是很高。

4.10.10 小结

第 4 章讨论了用于智能电网设计的几种分析工具，包括电压稳定性分析、功角稳定性分析以及状态估计。本章对这些方法进行了回顾，并对研究中遇到的挑战做了讨论。

参考文献

[1] M.H. Mickle and T.W. Sze. *Optimization in Systems Engineering*. Scranton, 1972.

[2] J.A. Momoh. *Electric Power System Application of Optimization*. Marcel Dekker, New York, 2001.

[3] G. Riley and J. Giarratano. *Expert Systems: Principles and Programming*. PWS Publisher, Boston, MA, 2003.

[4] A. Englebrecht. *Computational Intelligence: An Introduction*. John Wiley & Sons, 2007.

[5] M. Dorigo and T. Stuzle. *Ant Colony Optimization*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2004.

[6] P.K. Skula and K. Deb. "On Finding Multiple Pareto-optimal Solutions Using Classical and Evolutional Generating Methods." *European Journal of Operational Research* 2007, 181, 1630–1652.

[7] C.W. Taylor. "The Future in On-Line Security Assessment and Wide-Area Stability Control." *IEEE Power Engineering Society* 2002, 1, 78–83.

[8] "Appendix B2: A Systems View of the Modern Grid-Sensing and Measurement." *National Energy Technology Laboratory* 2007.

[9] T. Bottorff. "PG&E Smart Meter: Smart Meter Program." NARUC Summer Meeting, 2007.

[10] D. Zhengchun, N. Zhenyong, and F. Wanliang. "Block QR Decomposition Based Power System State Estimation Algorithm." *ScienceDirect* 2005.

[11] A. Jain and N.R. Shivakumar. "Power System Tracking and Dynamic State Estimation."

[12] Y. Tamura, K. Sakamoto, and Y. Tayama. "Voltage Instability Proximity Index (VIPI) Based on Multiple Load Flow Solutions in Ill-Conditioned Power System," Sixth IEEE Conference on Decision and Control, vol. 3, pp. 2114–2119, August 2002.

推荐阅读

A.G. Barto, W.B. Powell, D.C. Wunsch, and J. Si. *Handbook of Learning and Approximate Dynamic Programming*. IEEE Press Series on Computational Intelligence, 2004.

M. Dorigo and T. Stutzle. "The Ant Colony Optimization Metaheuristic: Algorithms, Applications and Advances." In F. Glover and G. Kochenberger, eds.: *Handboook of Metaheuristics*. Norwell, MA, Kluwer, 2002.

R.C. Eberhart and J. Kennedy. "A New Optimizer Using Particle Swarm Theory." In *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micromachine and Human Science*, 1995; 39–43.

M. Gibescu, C-C Liu, H. Hashimoto, and H. Taoka. "Energy-Based Stability Margin Computation Incorporating Effects of ULTCs." In *IEEE Transactions on Power Systems* 2005, 20.

J.L. Marinho and B. Stott. "Linear Programming for Power System Network Security Applications." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 1979, PAS-98, 837–848.

B. Milosevic and M. Begovic. "Voltage-Stability Protection and Control Using a Wide-Area Network of Phasor Measurements." *IEEE Transactions on Power Systems* 2003, 18, 121–127.

J. Momoh. *Electrical Power System Applications of Optimization*. CRC Press, 2008.

A.G. Phadhke. "Synchronized Phasor Measurments in PowerSystems." *IEEE Computer Applications in Power* 1993, 6, 10–15.

W.H. Zhange and T. Gao. "A Min-max Method with Adaptive Weightings for Uniformly Spaced Pareto Optimum Points." *Computers and Structures*, 2006, 84, 1760–1769.

L. Zhao and A. Abur. "Multiarea State Estimation Using Synchronized Phasor Measurements." *IEEE Transactions on Power Systems* 2005, 20, 2.

第 5 章　用于智能电网设计的计算工具

5.1　计算工具概述

在运筹学、系统工程以及计算机科学等领域，已经开发了各种最优化和计算智能技术，并将其成功应用于大型电力系统中。如参考文献［1-37］将人工智能、启发式或进化优化方法应用到最优潮流、潮流分析、状态估计、稳定性分析以及机组组合等问题中。本章对计算工具的研究，侧重于回答如下问题：

1）当未来电网中接纳大量波动性、随机性可再生能源时，现有计算工具是否还足以对系统充裕性进行建模和评估？

2）现有计算工具能否应对未来电网的随机性和不确定性？

3）某些优化问题适宜采用预测/预期优化㊀技术，现有计算工具能否处理这类问题？

现有的经典优化方法不足以处理智能电网中出现的自适应性和随机性。那么，未来新型计算工具和技术应定义为：能在各种不确定性条件下对智能电网进行评估、协调、控制、运行和规划的计算平台。新一代的计算工具应能够应对如下挑战：

1）真实世界模型的不完整、不充分性。

2）传统计算智能所不具有的解决大规模系统、复杂问题的能力。

3）运行人员用以解决问题的方案难以通过算法或数学公式表示，只能利用经验法则来表达。

4）运行人员在决策过程常使用模糊的语言描述。

下面逐一讨论各类计算工具的概念、算法和局限性。

5.2　决策支持工具（DS）

决策支持工具（DS）中包含了博弈论、决策支持系统以及层次分析法（Analytical Hierarchical Processes，AHP），用于智能电网规划与运行中所需的多目标优

㊀ 所谓预期优化，是指优化的输入中不仅包含过去和现在的状态，还包含对未来的预测结果。——译者注

化和风险评估。决策分析（DA）是一个强大的工具，能将一个完全不确定性问题转化为理性决策问题，从而通过定量的数值比较快速地形成决策结果。它通常由一位或一群决策者在不确定的环境下做出选择。

值得注意的是，与备选方案相关的信息的准确和全面性是取得高质量决策的前提条件，但这些信息的质量却参差不齐：既可能是硬数据，也可能仅是一些主观解释；既可能是一些确定性信息，也可能是一些以概率和模糊数表达的不确定性信息。由于决策问题所依赖的信息在类型和质量方面存在多样性，要求在信息处理过程中采用特别的方法与技术[7]。

决策分析利用一系列的过程、方法、工具，对决策问题中的要素进行识别、表示和评估。它首先对决策问题进行规范化表示，然后利用最大期望效用理论进行决策，最后将决策和建议从规范化表示转换为明确的行动方案并推荐给决策者。多目标决策分析（Multi-Criteria Decision Analysis，MCDA）是一类重要的决策分析。多目标决策问题中包含多个相互制约、相互冲突的目标，为此，多目标决策分析需要在多个目标和各种限制之间寻求一种合理的妥协，以总目标为基准进行协调，达到统筹兼顾。层次分析法属于一类重要的多目标决策分析方法。

决策分析一般需要经过两个阶段。

阶段 1：根据损益数据及相关概率计算预期货币值（Expected Monetary Value，EMV），然后绘制决策树，形成基于最高预期货币值/期望收益值或最低预期损失的最优决策。

阶段 2：考虑抽样概率以及更为精确的信息，重新计算预期货币值/期望收益值，根据计算结果更新阶段 1 形成的决策树，形成更优的决策结果。

应用决策分析时需要小心。如果支撑分析的基础数据很不充分，那就很难评估决策的有效性，并且容易导致对决策问题的过于简化。决策分析的结果往往并不服从常规统计分析的结论。严格地说，根据决策分析的基本原则，无论现实中改进的余地多么有限，形成的决策方案都必须能产生最大效用。决策分析尤其擅长解决多目标优化问题，例如，智能电网中计及风险与概率的多目标优化问题。

层次分析法（AHP）

层次分析法是将与决策相关的元素分解成目标、准则、备选方案等层次，然后评估利弊，最后进行综合分析并形成最终方案的决策方法。层次分析法尤其适合那些需要将定性分析和定量分析相结合的场合。图 5.1 是该方法的示意图。

层次分析法广泛应用于诸如规划、资源分配以及冲突解决[7]等需要进行多目标决策的领域中。在其一般形式中，层次分析法是一种非线性决策框架，它结合了决策者解决复杂问题时所运用的演绎法和归纳法，而无需使用三段论推理。为了做到这点，层次分析法通过综合考虑多种要素，建立多级递阶的结构模型，然后对多

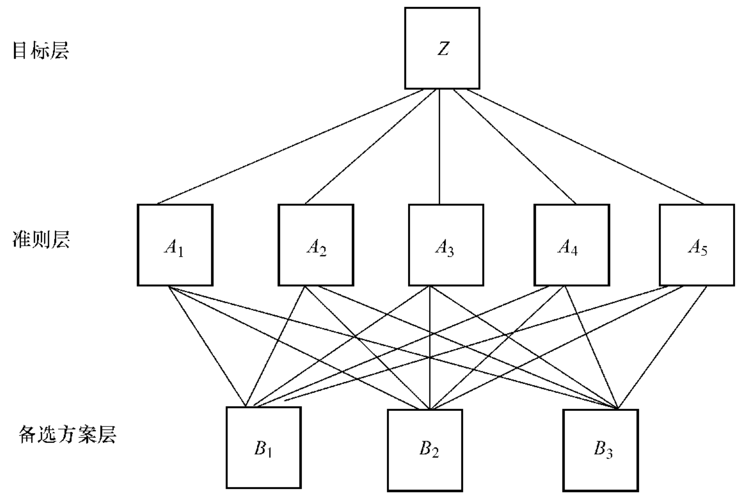


图 5.1　层次分析法[㊀]

种备选方案的重要度进行定量评价，通过优化排序获得最终方案。备选方案位于该结构模型的最底层，各备选方案的综合重要度可表示为如下多重线性形式：

$$\sum_{i_1,\cdots,i_p} x_1^{i_1} x_2^{i_2} \cdots x_p^{i_p}$$

考察上述求和式的其中一项。为简化计，记其为 $x_1 x_2 \cdots x_p$，则其乘积积分为

$$x_1 x_2 \cdots x_p = e^{\log x_1 x_2 \cdots x_p} = \prod_{i=1}^{n} e^{\log x_i} = e^{\sum_{i=1}^{n} \log x_i} \rightarrow e^{\int \log x(\alpha)\,d\alpha}$$

5.3　优化技术

用于智能电网最优化和规划的优化技术包括静态优化和动态优化，例如线性规划、混合整数规划（Mixed -Integer Programming，MIP）以及动态规划（Dynamic Programming，DP）等（见图 5.2）。线性规划、非线性混合整数规划、动态规划以及拉格朗日松弛方法常用于求解传统电力系统的运行问题，但由于这些优化方法只能求解静态网络，所以在智能电网中的应用有限，如能将其与决策支持系统结合使用，可以获得更好的效果。下面就对这些优化技术的数学公式、实现以及求解过程等进行总结。

㊀ 原文配图错误，译者根据层次分析法基本原理重新配图。

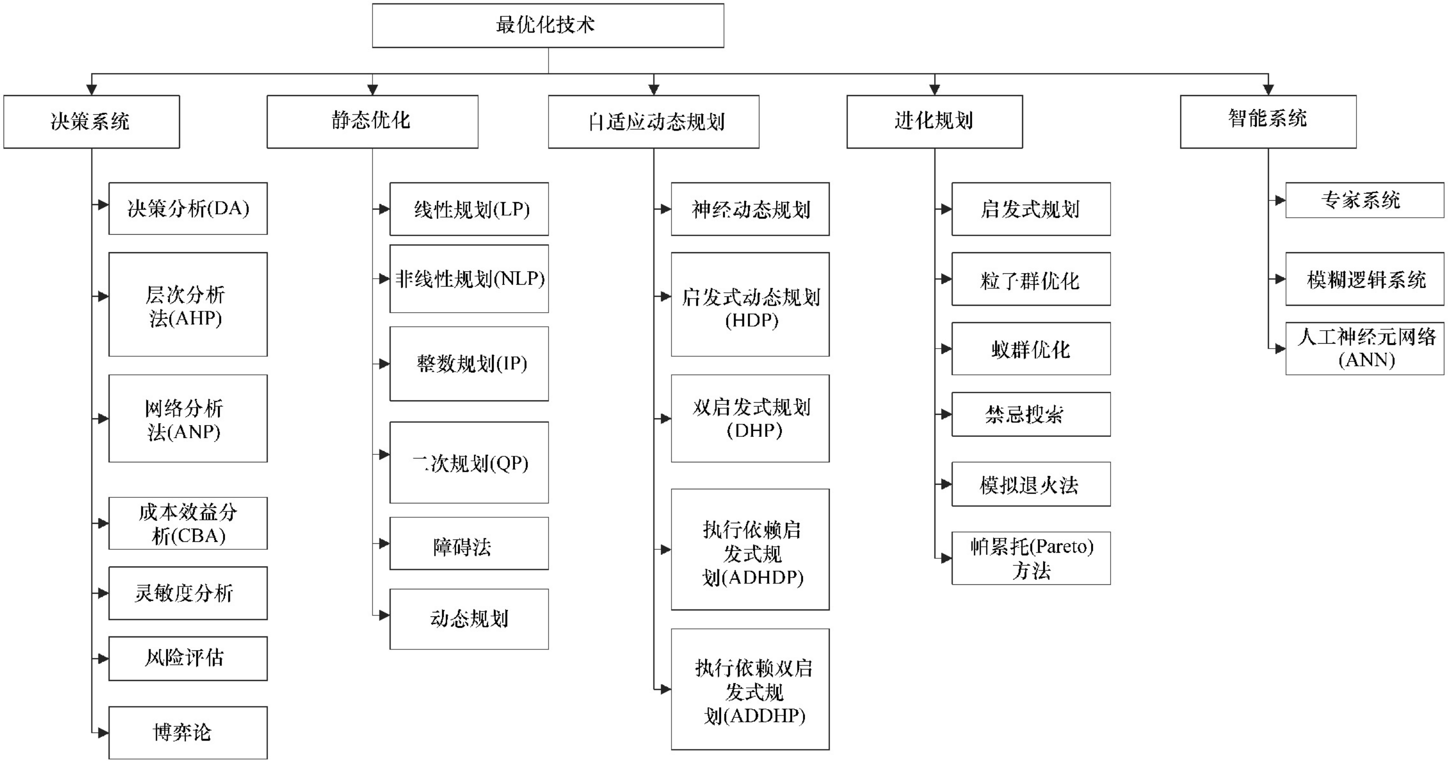

最优化技术
决策系统
静态优化
自适应动态规划
进化规划
智能系统
决策分析(DA)
层次分析法(AHP)
网络分析法(ANP)
成本效益分析(CBA)
灵敏度分析
风险评估
博弈论
线性规划(LP)
非线性规划(NLP)
整数规划(IP)
二次规划(QP)
障碍法
动态规划
神经动态规划
启发式动态规划(HDP)
双启发式规划(DHP)
执行依赖启发式规划(ADHDP)
执行依赖双启发式规划(ADDHP)
启发式规划
粒子群优化
蚁群优化
禁忌搜索
模拟退火法
帕累托(Pareto)方法
专家系统
模糊逻辑系统
人工神经元网络(ANN)

图 5.2　最优化技术

5.4 经典优化方法

5.4.1 线性规划

在线性规划问题中，优化目标和约束条件皆为线性函数。线性规划问题的一般表达式为

$$\begin{aligned} &\max\ c^{\mathrm{T}}x \\ &\text{s. t.}\quad Ax \leqslant b \\ &\qquad\quad x_i \geqslant 0 \qquad \forall\, i \in \{1, n\} \end{aligned}$$

对于上述线性规划问题，求其全局最优解的常用方法有单纯形法、内点算法或整数规划法。这些算法都适用于含线性目标函数和线性约束条件的最优化问题。这类问题的求解步骤为：

1）初始化步骤：引入松弛变量（如果需要），确定等式约束的初始基可行解。

2）迭代步骤：在每次迭代中，从当前基本可行解移动到邻近更优的基本可行解。

3）确定进基变量：选择一个非基变量，当该非基变量增加时，使目标值增加最快。再确定出基变量：选择一个基变量，当已确定的进基变量增加时，该基变量第一个变为零。

4）确定新的基本可行解。

5）最优性判别和终止条件。将目标函数用非基变量表示，检查非基变量的系数，若所有系数均非正，则得最优解，否则进一步迭代。

传统的线性规划受限于其静态问题求解能力，不能完全满足智能电网的需要。为了适应智能电网的随机性、可预测性、自适应性等要求，需要对线性规划方法进行改进。

5.4.2 非线性规划

非线性规划（NLP）一般采用拉格朗日或者牛顿法来解决约束和无约束最优化问题。这种方法假设所有的目标函数是连续光滑的。然而，在许多情况下，电力系统的数学模型不符合该假设。

该方法适用的一般性问题结构如下：

$\max f(y)$

s. t. $C_i \leqslant f_i(y) \leqslant D_i,\ \forall\, i \in \{1, n\}$

解决这类非线性规划问题需要首先验证可行性条件。收敛性则取决于由广义KT定义的充分条件是否得到满足。参考文献［36］为解决此类非线性规划问题提供了详细的公式和方法。灵敏度方法、障碍函数法、二次规划法都可求解这类问题。简而言之，对于所有非线性规划问题：

1）基于对函数在约束或无约束条件下极值的研究，确定初始可行集。

2）检查最优性条件是否满足。

3）确定局部或者全局最优候选解。

4）进一步进行最优化并且得到满足约束条件的目标函数的最优值。

这个过程会使用 Kuhn-Tucker（KT）和 Karush-Kuhn-Tucker（KKT）一阶和二阶充要条件[36,37]。它可用于函数或者泛函。非线性规划问题可根据目标函数或约束条件的性质分类。

非线性规划需要面对两方面的挑战：一是大量计算的负担；二是目标函数和约束条件中的静态参数限制。此外，如果建立的模型对真实模型做了过多简化，就可能导致非线性规划包括二次规划的结果不佳。

二次规划在很多重要问题中是一种常用的方法，在电力系统中其实用价值也很明显，因为电力系统中的很多问题都能用一系列二次规划问题或者序列二次规划（Sequential Quadratic Programming，SQP）解决。

另一方面，与线性规划一样，此类非线性规划问题难以适应需要处理可变性和预测性的情况。因此，如果需要利用它们作为计算工具用于分析智能电网，那么就有必要对智能电网的特征进行研究。考虑智能电网的自适应性、预见性和随机性等特点，对这些方法进行改进以满足智能电网的最优化要求。

5.4.3　整数规划

整数规划是线性规划的一个特例，其全部或部分决策变量必须取离散的整数值。例如，若整数值仅能取 0 或 1，这就是一个二进制决策问题（0-1 规则）。混合整数规划（MIP）问题的一般结构如下：

$$\max P(x) = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j$$

$$\text{s.t.} \sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \leq b_i, \forall i \in \{1, m\}$$ [㊀],

$x_j \geq 0$，$\forall j \in \{1, n\}$，x_j是整数，$\forall j \in \{1, I\}$。

分支定界法流程如下：

1）初始化：设定 $P^* = -\infty$，P^* 是 P 的初始最优值。

2）分支：这个步骤包含构建子问题，把二进制变量的值固定为 0 或 1；或者按自然序取第一个变量的值作为分支变量。

3）定界：对于每一个子问题，通过确定最好的可行解得到最优值的一个上界。对于每个新的子问题，可以通过如下方法获得上界：对其线性规划松弛问题，应用单纯形法求得最优解并将其 P 值作为上界。

㊀　原文公式有误，译者做了更正。——译者注

4）探测：如果一个子问题有可行解，则该解和其 P 值作为当前最优可行解和最好值（记作 P^*）存储起来。

5）最优性测试：反复这个迭代过程直到没有子问题存在为止。这时，当前的最优解即为原问题最优解。

纯整数规划或者 MIP 问题带来了极富挑战性的大计算量。高效的线性规划技术能够枚举基本线性规划问题在离散变量的每个可能的组合（节点），然而问题在于枚举的庞大数目。如果有 N 个离散变量，那么组合的可能数量将达到 2^N！对于二进制整数规划和 MIP 问题，可以采用分支定界技术克服大量计算的问题。此技术通过将整个问题划分为许多更小的子问题，然后以一定的逻辑顺序枚举解决它们。值得一提的是，直接使用该方法来解决智能电网问题有局限性，因为该方法处理的是静态数据，无法处理动态实时优化问题。

5.4.4　动态规划

动态规划方法用于解决序列或多阶段决策问题。一般来讲，它通过解决一系列单变量问题来解决多变量问题。这需要将不同变量作一系列投影。换句话说，它将第一个变量首先投影于其他变量的子系统中，然后将第二个变量作投影，然后第三个，依此类推。这是处理在目标和约束中存在时间变量和噪声的一个可选优化技术。

基于贝尔曼（Bellman）最优化原理的两种普遍采用的技术是：

1）逆序递推法和顺序递推法，或查表法；

2）基于复合函数的微积分。

两种技术都不能克服维数障碍，所以不适合大型复杂电力系统。

5.4.5　随机规划与机会约束规划（CCP）

随机规划用于解决这样一类线性规划问题：确定性假设遭到严重破坏以致某些参数必须被视为随机变量。解决这类含随机性的线性规划问题的方法有两种：

1）随机规划（SP）；

2）机会约束规划（CCP）。

随机规划要求所有的约束条件以一定概率成立，而机会约束规划允许任何约束条件以小概率有效。

随机规划形式：考虑目标函数 $\max Z = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j$。因为 Z 能用某个确定函数替换，于是我们用 $E(Z) = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j$ 表示。同样，函数约束为 $\sum a_{ij} x_j \leqslant b_j$，$i = 1, 2, 3, \cdots, m$，最终解需要满足由系数 a_{ij}、b_j 所有可能组合确定的约束条件。

该问题可分成两类：

1）单阶段问题：a_{ij}、b_j 是随机变量且相互独立，a_{ij}、b_j 都需满足 $\sum \max a_{ij} x_j$

$\leqslant \min b_j$ 。

2）多阶段问题：变量 x_j 有两个或更多时间阶段值。x_j 是第一阶段变量，其他是第二阶段、第三阶段等。该方法首先获得第一阶段变量值，随着时间和新事件的发生确定之后时间阶段的变量值。因此，多阶段随机规划问题更适合于基于未来情况的多阶段问题。

当模型中的一些参数是随机变量，随机规划形式要求所有的约束条件对随机变量的任意组合都成立。然而，机会约束形式只要求每个约束条件对大部分组合保持成立。在机会约束规划的公式中，用 $P(\sum a_{ij}x_j \leqslant b_j) \geqslant \alpha_1$ 项取代了原先线性规划中的 $\sum a_{ij}x_j \leqslant b_j$ 项，其中 α_1 在 0 ~ 1 之间取值，一般选择为接近于 1。因此，当且仅当 $P\left(\sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j \leqslant b_j\right) \geqslant \alpha_1$ 时，非负解（x_1，x_2，x_3，…，x_n）是可行的。意外概率 $1-\alpha_1$ 表示随机变量满足条件 $\sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j > b_j, j = 1,2,\cdots,n$ 的允许风险率。因此，最佳方案是选择某个非负解，在随机变量 RV（a_{ij}，b_i，c_i）取相应值时，它能满足所有的原始约束条件。

一般而言，在机会约束规划计算过程中，LP 包含所有相关联的参数 a_{ij}，这样 b_i、c_j 是 b_i 的随机变量概率分布，c_j 和 b_i 相对独立（其中 $j=1$，2，3，4，…，n；$i=1$，2，3，…，m）。

随机规划适应于含随机性、不确定性、噪声的通信网络、交通以及电网等领域。到目前为止，随机规划在一些较小规模的系统中得到了应用。

5.5　启发式优化

考虑到智能电网的可预测性和随机性特点，未来的研究工作应包括：

1）元件建模应考虑预测性与随机性。

2）选择新型优化方法，如自适应动态规划（ADP）。

3）电力系统安全性受各种事故影响，可能导致系统从正常和告警状态进入紧急状态。正在开发的新型优化工具，可以研究不同事故对系统安全性的影响。需要解决的一些问题包括现有模型不能计及负荷和电源的不确定性。

4）选择适合于研究的事故集合（可用于离线分析的实测数据）。

5）考虑解的稳定性，建立新型可再生能源的定价模型以及经济边界收益模型。

研究者提出了一种新型优化策略：

1）建立能够考虑用户和供电不确定性的新型目标函数。

2）建立能够表达随机性和时变性的可再生能源模型。

3）更新模型，进行仿真分析。

4）定义新型系统元件的性能指标。

5）然后，在基准潮流研究中求解概率潮流，同时考虑新的事故集以定义越限。

6）选择合适的优化技术，如启发式方法、混杂方法或自适应动态规划等，这类方法需要能够在求解最优解时考虑可预测性和随机性。

5.5.1 人工神经元网络（ANN）

人工神经元网络是基于自然遗传学中大脑运作的原理，一般包括前向和后向传播技术。人工神经元网络具有通过对大量数据进行训练生成算法来分类和识别的能力。这个典型方法的最突出特征在于新颖的信息处理系统结构，它包含了大量高度关联的处理单元，这些单元能够解决特定问题。人工神经元网络通过实例进行学习，然后构建特定结构来实现特定的应用，比如特征识别或者数据分类。

人工神经元网络具有从复杂且不精确数据中获得重要信息的强大能力，可以应用于提取人类甚至其他计算机技术也难以识别的复杂特征。一个经过训练的神经网络可被看做是处理数据信息的专家。它能提供预测，给出新情况发生的概率以及回答“如果……会导致……”之类的问题。

人工神经元网络其他方面的优势包括：

1）自适应学习：基于训练或者之前的经验，能够学习怎样完成任务。

2）自组织：通过学习阶段接收的信息来构建自身结构。

3）实时运行：适合并行计算，可设计、生成专门的硬件来完成这种运算。

4）冗余编码提高容错性：部分神经网络的错误或遭到破坏只会引起品质下降。

后向传播网络技术是目前最被熟知且广泛应用的神经网络技术。这种网络技术是基于多层的神经网络模型，在人工神经节点有不同的阈值函数和更强壮可靠的学习规则。

前向传播包括如下两个步骤：

步骤1：用公式 $x_j = \sum y_i W_{ij}$ 计算总加权输入 x_j，其中，y_i表示上层第 i 个单元的输出，W_{ij}是连接第 i 个单元与第 j 个单元之间的权值。

步骤2：利用激励函数计算本层第 j 个单元的输出 y_j，常用的激励函数是如下sigmoid 函数：

$$y_j = \frac{1}{1 + e^{-x_j}}$$

一旦确定了所有的输出值，由以下公式计算输出端的总误差 E：

$$E = \frac{1}{2}\sum_{i}(y_i - d_i)^2$$

式中，y_j是输出层（顶层）第 j 个单元的实际输出；d_j是第 j 个单元的期望输出。

后向传播包括如下 4 个步骤：

步骤 1：计算由输出 y_j的变化所导致的误差变化的变化率，用误差偏导 EA 表示，其值等于实际输出和期望输出的差值：

$$EA_j = \frac{\partial E}{\partial y_j} = y_j - d_j$$

步骤 2：计算由输入 x_j的变化所引起的误差变化的变化率，用 EI 表示，其值等于步骤 1 的计算结果乘以输出 y_j对输入 x_j的导数：

$$EI_j = \frac{\partial E}{\partial x_j} = \frac{\partial E}{\partial y_j} \times \frac{\mathrm{d}y_j}{\mathrm{d}x_j} = EA_j y_j (1 - y_j)$$

步骤 3：计算由连接权值 W_{ij}的变化所引起的误差变化的变化率，用 EW 表示，其值等于步骤 2 的计算结果乘以该连接权值所对应的输出值 y_j：

$$EW_{ij} = \frac{\partial E}{\partial W_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial x_j} \times \frac{\partial x_j}{\partial W_{ij}} = EI_j y_i$$

步骤 4：计算由上一层输出 y_i的变化所引起误差变化的变化率。为计算出误差所受的总的影响，需将所有这些分开的影响加到输出单元上。

$$EA_i = \frac{\partial E}{\partial y_i} = \sum_j \frac{\partial E}{\partial x_j} \times \frac{\partial x_j}{\partial y_i} = \sum_j EI_j W_{ij}$$

诸如自适应控制、故障诊断和分类、网络重构、电压稳定评估、暂态稳定评估等应用都需要实时数据来完成监测和控制，人工神经元网络可在上述智能电网应用中发挥作用。

5.5.2　专家系统（ES）

专家系统利用启发式或规则驱动的决策方法来求解优化问题。在故障诊断领域，专家系统可以判断故障性质并给出故障恢复策略，因而也有较多应用。由于专家系统的原理是利用领域专家的专门知识或经验并模拟人类的思维方式解决问题，所以它的有效性和可靠性直接取决于知识库（也称规则库）。专家系统的基本构成如图 5.3 所示。

与人类专家相比，专家系统具有许多优点，例如，专家系统不会“疲劳”，因而可以连续工作并保持高可靠性；无需支付昂贵的专家费用；响应速度快；推理严谨，结论可信度高。所以，专家系统在电力系统诸多领域中取得了成功应用，如最优切负荷、无功功率优化、离散控制（如串补电容控制、变压器有载调压等）和经济调度。实用中，专家系统技术常和人工神经元网络或各种数值计算型/启发式优化技术相结合，构成混合型专家系统。在智能电网中，基于知识库的专家系统

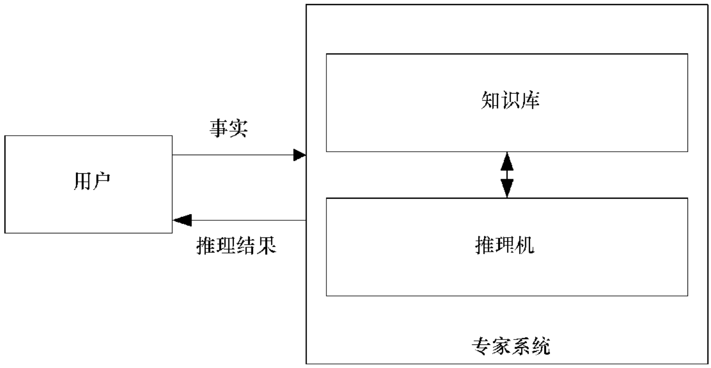


图 5.3　专家系统的基本组成

（或各种混合型专家系统）可以辅助运行人员优化电网的运行管理，一些原本用经典优化技术求解的问题可以改用专家系统或混合型专家系统求解。

经典逻辑为二值逻辑（布尔逻辑），只能处理“真”、“伪”问题。模糊逻辑对此作了扩展，使其能够处理现实生活中的“部分真”、“部分伪”等问题。为了对这类不明确问题进行分析，利用隶属度函数来精确刻画某个概念的真实度。在解决某些控制问题时，利用模糊逻辑往往更易于将过程变量控制在容许范围内。模糊集合可视为普通集合的一般形式，它可以为每个元素赋予一个［0，1］上的隶属度。将模糊逻辑与规则推理结合起来可以构成模糊推理系统，对于求解某些复杂非线性系统具有良好效果。模糊推理系统的简化流程如图 5.4 所示。



图 5.4　模糊推理简化框图

智能电网的许多实时决策系统都需要利用上述模糊化技术。所以，在智能电网设计中，应在自动发电控制（AGC）、静态安全评估（SSA）以及状态估计（SE）等控制或功能中考虑模糊逻辑的应用。

5.6　进化计算技术

进化计算技术基于自然遗传理论，用以解决组合优化问题，包括粒子群算法、蚁群算法、遗传算法（GA）和人工智能等。这类技术通过学习适应新环境，并对自然现象进行概括、抽象、发现和综合。进化算法中的种群由大量个体组成，每一个个体被称为染色体，定义了其在种群中的特性。每个个体的特性称为基因。拥有更大生存几率的个体会获得更多繁殖的机会[7]。后代由父母部分的染色体组成，

该过程称为交叉操作。种群中每个个体都存在突变的可能性，通过突变来改变其染色体上的等位基因。

5.6.1　遗传算法（GA）

遗传算法模拟生物进化过程，用遗传理论中的术语描述算法中的要素。参考文献［7-8］中给出了典型的遗传算法过程，如图 5.5 所示。首先，由选择出来的父代繁殖产生子代，并经过交叉或变异等进化过程，找到性能最好的个体。种群中的这些个体会被当做父代继续繁殖，直到找到最适合的子代或者满足条件的方案。

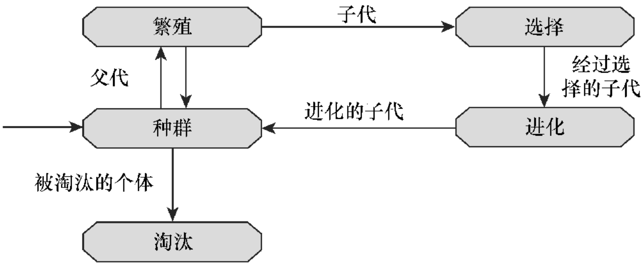


图 5.5　经典的遗传算法周期

遗传算法广泛应用于电力系统扩建和电网规划、运行规划、发电、传输和分布式运行以及无功功率规划分析等需要考虑不确定性和随机性的实时运行问题。

5.6.2　粒子群优化（PSO）

粒子群算法是一种基于群体的随机优化技术，最早由 Eberhart 和 Kennedy 在 1995 年提出。通过对鸟类和鱼类成群的社会行为的模拟，指导粒子在全局范围内搜寻最优解。

粒子群中的个体遵循一种基本的行为规律：即群体中的每个个体都可以从邻近的个体和本身的以往经验中获益。粒子呈现出的群体行为是在多维搜索空间中寻找最优位置[5]。研究的群体被称为种群，而每个个体被称为粒子。每一时刻 t，粒子的位置 x_i的改变由向量 $v_i(t)$ 决定，公式如下：

$$x_i(t+1)=x_i(t)+v_i(t+1)$$

向量 $v_i(t)$ 根据粒子本身经验和种群中邻近粒子共同改变粒子飞行的轨迹，公式如下：

$$v_{ij}(t+1)=v_{ij}(t)+c_1r_{1j}(t)[y_{ij}(t)-x_{ij}(t)]+c_2r_{2j}(t)[\hat{y}_j(t)-x_{ij}(t)]$$

式中，$v_{ij}(t)$ 为粒子 i 飞行速度向量的第 j 维分量；$x_{ij}(t)$ 为粒子 i 在 t 时刻的第 j 维分量下的位置；c_1、c_2为加速度常数，分别用以表示粒子的“认知”和“社会”部分的权重；$r_{1j}(t)$、$r_{2j}(t)$ 为两个在［0，1］范围内的随机函数，目的是增加算法随机性。

粒子群算法的两个重要的变量分别为个体最优值（Local Best，lbest）和全局最

优解（Global Best，gbest）。lbest 记录粒子经历过的最好位置；gbest 表示种群中所有粒子经历过的最好位置。

5.6.3 蚁群优化

蚁群算法在组合优化问题求解中取得了较好的成效。其算法的特点在于把最优方案结构的先验信息和已知方案结构的后验信息相结合[6-7]。蚁群优化采用并行计算和非同步代理的方式描述蚂蚁群，用蚂蚁行走路径表示待优化问题的可行解。计算过程通常包含一个本地随机决策策略，该策略由两个参数决定，即信息素及信息素轨迹。信息素指导以后的搜索行为。在构建解空间或找到完整路径之前，蚂蚁会评估当前路径，并修改用于自身路径中轨迹信息素。

蚁群优化算法包含轨迹挥发和守护行动（Daemon Actions）。信息素轨迹挥发过程会使遗留的信息素数量随时间而逐步减少，以避免信息素无节制的积累。相反地，守护行动实现集中行为，该行为不能由单个蚂蚁完成。例如对本地优化过程的调用，或更新全局信息，用以决定是否从非局部角度改变搜寻过程。算法过程如下：

begin
Intialize $\tau_{ij}(0)$;//初始化
Let t = 0;
Set location, n_k = origin node;//设定位置, n_k为初始节点
while stopping criteria is not true //不满足终止条件
for $k = 1, \cdots, n_k$
//创建路径, $x^k(t)$
$x^k(t) = 0$;
  for destination node is reached;//到达目的节点
  remove loops from $x^k(t)$;
  calculate $f(x^k(t))$;
end
end
for each link(i,j) of the graph
//信息素递减;
$\tau_{ij}(t) = (1-\rho)\tau_{ij}(t)$
end
for $k = 1, \cdots, n_k$
  for link(i,j) of $x^k(t)$
  $\Delta\tau^k = \dfrac{1}{f(x^k(t \lim\limits_{\delta x\to 0}))}$

$$\tau_{ij}(t+1) = \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^{n_k} \Delta\tau_{ij}^{k}(t)$$

end

end

$t = t + 1$;

end

return $x^k(t)$ for smallest $f(x^k(t))$. //返回最小 $f(x^k(t))$ 对应的 $x^k(t)$

5.7　自适应动态规划技术

自适应动态规划（Adaptive Dynamic Programming，ADP）通过综合确定性数据和随机数据的时间依赖性，对未来做出决策。

自适应动态规划又被称为增强学习规则、自适应评价方法、神经动态规划方法或近似动态规划方法[6,7]（见图 5.6）。自适应动态规划在时间域内通过学习逼近的方式处理优化问题，以解决传统优化方法在处理大规模和缺少先验知识的情况下的不足。自适应动态规划同样也克服了动态规划方法的维数障碍。其目的在于最大化未来所有时间段内效用函数和的期望：

$$\text{Maximize} \sum_{k=0}^{\infty} (1+r)^{-k} U(t+k)$$

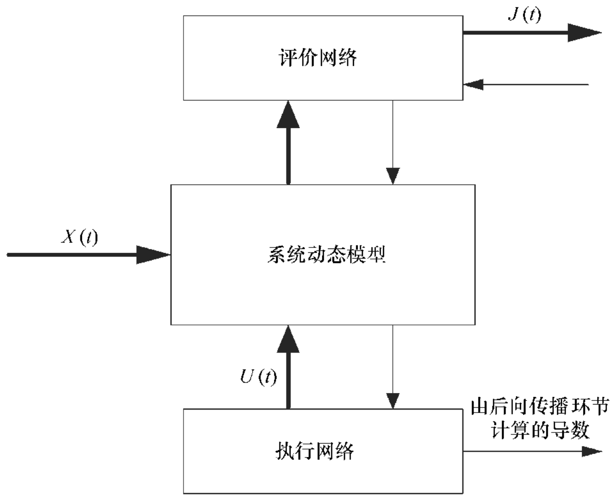


图 5.6　ADP 系统结构

自适应动态规划算法中的主要术语有：

$\underline{u}(t)$：执行向量；

$U(t)$：系统最大化的效用函数；

$\underline{X}(t)$：传感器输入；

r：折扣因子（仅用于无限时域问题中）；

< >：表示期望值；

J：性能指标函数；

$R(t)$：受控对象在 t 时刻的完整状态描述；

A：执行网络；

F_W_{ij}：权重 W_{ij}下的误差导数。

自适应评价设计（Adaptive Critic Design，ACD）是一种基于神经网络的设计方法，通过综合强化学习和近似动态规划方法的思想进行优化求解。

自适应评价设计由评价网络和执行网络组成，用以求解最优控制的 Hamilton-Jacobi－Bellman 方程。评价网络近似得到动态规划中 Bellman 方程的性能指标函数 J，该方法被称为启发式动态规划。执行网络为最大或最小化性能指标函数 J 提供最优控制。

基于动态规划，有下面几种自适应评价设计：

1）启发式动态规划（Heuristic Dynamic Programming，HDP）中评价网络的输出为 $J(R(t))$的近似值：

$$J(R(t)) = \underset{u(t)}{\mathrm{Max}}\left(U(R(t),u(t)) + \frac{(J(R(t+1)))}{1+r}\right)$$

2）双启发式动态规划（Dual Heuristic Programming，DHP）中评价网络的输出为 $J(R(t))$的偏导数：

$$J(R(t)) = U(R(t),u(t)) + (J(R(t+1))) - U_0$$

$$\lambda_i(R(t)) = \frac{\partial J(R(t))}{\partial R_i(t)} = \frac{\partial}{\partial R_i(t)}U(R(t),u(R(t))) + \left(\frac{\partial J(R(t+1))}{\partial R_i(t)}\right)$$

$$= \frac{\partial J(R(t),u(t))}{\partial R_i(t)} + \sum_j \frac{\partial U(R,u)}{\partial u_j}\cdot\frac{\partial u_j R(t)}{\partial R_i(t)} + \sum_j\left(\frac{\partial J(R(t+1))}{\partial R_i(t+1)}\cdot\frac{\partial R_j(t+1)}{\partial R_i(t)}\right)$$

$$+ \sum_{j,k}\left(\frac{\partial J(R(t+1))}{\partial R_j(t+1)}\cdot\frac{\partial R_j(t+1)}{\partial u_k(t)}\cdot\frac{\partial u_k(t)}{\partial R_j(t)}\right)$$

3）全局双启发式动态规划（Globalized DHP，GDHP）中评价网络的输出为 $J(R(t))$ 的近似值，目的是减小 J 的隐含偏导的误差。该方法兼顾了 HDP 和 DHP 方法的优点。

启发式动态规划解决了当问题规模扩大时求解速度降低的困境，而双启发式动态规划在实现中存在困难。上述三种方法都可产生执行独立的评价网络，但也有将 $R(t)$ 和 $u(t)$ 作为评价网络输入的方法（ADHDP，ADDHP）。

执行依赖启发式动态规划（Action Dependent Heuristic Dynamic Programming，

ADHDP 或 Q-学习）引入了一个评价网络，其输出为 $J'(R(t),u(t),W)$，它近似于如下定义的 J'：

$$J'(R(t),u(t)) = U(R(t),u(t)) + \frac{(J(R(t+1)))}{1+r}$$

$$J'(R(t),u(t)) = U(R(t),u(t)) + \underset{u(t+1)}{\mathrm{Max}} \frac{(J'(R(t+1),u(t+1)))}{1+r}$$

5.8　Pareto 方法

Pareto 方法用于求解如下多目标优化问题：

$\min\limits_{x \in N} F\ (x)$

$s.t \quad g(x) = 0$

$h(x) \leqslant 0$

$a \leqslant x \leqslant b$

其中 $F(x) = (f_1, f_2, \cdots, f_m)^{\mathrm{T}}$

Pareto 方法目的在于通过各种方法寻找到 Pareto 最优解。由于目标函数在算法收敛性和多样性概念中存在冲突，所以上述问题的解并不唯一，且皆为 Pareto 最优的。根据定义，如果没有其他可行点 X 使 $f_k(X) \leqslant f_k(X^*)$，并且其中至少有一个严格不相等，那么可行解 X^* 为 Pareto 最优。

有两种方法可用于求解此类问题：

1）一步一个策略：该策略是每步寻找一个 Pareto 最优解，并重复执行该步骤。有许多求解多目标优化的经典方法，可为静态的或确定性的，主要是标准的迭代标量化方法，如加权法、ε-约束法、权衡比法或最小最大化法[5,6]。但是这些算法存在效率低下、在目标空间内不易于保持多样性等缺陷。在解决问题的每一步，每个子问题的解会与不可行域和局部最优相抗衡。通过引入优化算法，来了解如何针对不同的初始点分别求解将会有效解决上述问题[2]。

2）同步策略：该策略借助遗传算法或其他种群方法实现在种群中的并行搜索。由于减少了优化算法在求解多目标问题上的复杂度，这种方法的效率被极大地提升。关键信息（包括解决子问题需要的信息）在种群中通过交换（或重组）来分享。

Pareto 方法常用于增强静态优化技术。

5.9　混合优化技术及智能电网应用

将混合智能系统如免疫神经系统、免疫群系统、模糊神经系统、神经群系统、

模糊粒子群系统、模糊遗传算法和神经遗传系统等与上述计算方法相结合，将有效提升算法效果。这些混合算法（见表 5.1）提升了算法在自学习能力方面的智能性[7]，从而有助力于增强智能电网的功能。

这些先进的优化技术，由于其特点不同，在智能电网问题中适用的环境也不尽相同。其应用范围包括电力系统的非线性时变动态模型、处理动态性和随机性问题等。这些技术将被用于 FACTS 控制器、系统学习、电压轮廓（Voltage Profile）的训练集、机组组合优化、离散调整控制、电力系统规划、并行计算等。

表 5.1 智能电网分析和设计中的混合智能计算工具

	模糊算法	GA	AOC	ANN	EP	PSO	ADP
模糊算法		X	X	X	X	X	X
遗传算法(GA)	X			X	X		X
蚁群算法(ACO)	X						X
人工神经网络(ANN)	X	X			X		X
进化规划(EP)	X	X		X			X
粒子群算法(PSO)	X	X		X	X		
自适应动态规划(ADP)	X		X			X	

5.10 计算挑战

先进的计算工具及其优化算法为计算求解带来了挑战。同时，如何获得有效的数据也是挑战之一，这就更需要发展传感器和通信技术以便于获得实时或准实时数据。

一些有待解决的问题包括：

软/硬件：算法求解的工具仅需要通过软件形式开发，还是需要通过整合相应硬件设备以帮助实现？

集成：软/硬件如何集成到系统中？是替代已有工具，还是增加到已有工具包中？

安装地点：计算工具需要安装在何处，例如：通过局域网还是广域网接入？是否有必要安装到所有的电源点和负荷点？是安装在站控层，还是用户端？

鲁棒性：计算工具在常规情况和极端情况下的鲁棒性如何？

灵敏性：灵敏性是否能够达到令人满意的效果？

标准：现有标准是否已经定义了计算工具的应用范围？

在实际的应用中，计算工具通常由工程师和缺乏专业知识与技能的操作员使用。于是，先进的计算工具需要易于解释，用户友好度高并易于自学。

随着电力系统规模的不断扩大，放松管制以及对环境问题的日益关注，对系统运行控制及自动化带来了新的要求和挑战。电力系统智能运行和控制模型的选择需

要紧密联系研究与应用的目的。为了实现经济指标、技术指标（安全性、稳定性和电能质量）和环境指标，智能的解决方案需要包含以下方面：具备对负荷、价格及辅助服务的预测能力；允许新型和可再生能源的接入；为各参与方提供竞价策略；对系统进行规划和控制；具备在通信中断条件下的决策能力；大量的分布式发电装置和需求侧响应的实施；在不同运行条件下能够改变控制参数等。

在电力领域中，通过风险管理和财务管理在预期收益最大化和投资风险最小化之间寻求理想的折中点。计算智能（Computational Intelligence，CI）方法是解决复杂智能电网技术问题的重要手段。例如，启发式优化技术可以同基于自然过程模拟的算法或以随机和模拟方法为依据的算法中的某些元素相结合。智能系统技术领域的研究中引入了数字信号处理技术、专家系统、人工智能和机器学习的方法。通过上述工具或其他工具开发的解决方案具有两点主要的优势：其一，开发时间较短；其二，系统对噪声、数据或信息丢失等不确定性因素的敏感度较低。由于来自环境、架线权、费用等方面的压力不断增大，无论是在管制还是放松管制的电力系统环境中，人们在寻求更为强大的计算工具方面都表现了越来越强烈的兴趣。

5.11　小结

第 5 章中总结了用于智能电网设计、规划和运行的经典优化技术和计算方法，并介绍了在电网设计中常见的 Pareto 方法。本章重点讨论了研究人员和工程人员在寻找最佳求解方法时所遇到的一些计算挑战。

参 考 文 献

[1] H.W. Dommel and W.F. Tinney. "Optimal Power Flow Solutions," *IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems*, 1968, PAS.87, 1866–1876.

[2] W.L. Winston. *Operations Research: Applications and Algorithms*, Boston: Duxbury, 1987.

[3] J.A. Momoh. *Electric Power System Application of Optimization*, New York: Marcel Dekker, 2001.

[4] Y.L. Abdel-Magid, M.A. Abido, and A.H. Mantaway. "Robust Tuning of Power Systems Stabilizers in Multimachine Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems* 2000, 15, 735–740.

[5] M. A. Abido. "Robust Design of Multimachine Power System Stabilizers Using Simulated Annealing." *IEEE Transactions on Energy Conversions* 2000, 15, 297–304.

[6] R.A.F. Saleh and H.R Bolton. "Genetic Algorithm-aided Design of a Fuzzy Logic Stabilizer for a Superconducting Generator," *IEEE Transactions on Power Systems* 2000, 15 1329–1335.

[7] P. Zhang and A.H. Coonick. "Coordinated Synthesis of PSS Parameters in Multi-machine Power Systems Using The Method of Inequalities Applied to Genetic Algorithms," *IEEE Transactions on Power Systems* 2000, 15, 811–816.

[8] Y.L. Abdel-Magid, M.A. Abido, S. Al-Baiyat, and A.H. Mantawy. "Simultaneous Stabiliza-

tion of Multimachine Power Systems Via Genetic Algorithms," *IEEE Transactions on Power Systems* 1999, 14, 1428–1439.

[9] A.L.B. do Bomfim, G.N Taranto, and D.M Falcao. "Simultaneous Turning of Power System Damping Controllers Using Genetic Algorithms," *IEEE Transactions on Power Systems* 2000, 15, 163–169.

[10] J. Wen, S. Cheng, and O.P. Malik. "A Synchronous Generator Fuzzy Excitation Controller Optimally Designed With a Genetic Algorithm," *IEEE Transactions on Power Systems* 1998, 13, 884–889.

[11] M.A. Abido and Y.L. Abdel-Magid. "Hybridizing Rule-based Power System Stabilizers With Genetic Algorithms," *IEEE Transactions on Power Systems* 1999, 14, 600–607.

[12] R. Asgharian and S.A. Tavakoli. "A Systematic Approach to Performance Weights Selection in Design of Robust H/sup/spl infin/PSS Using Genetic Algorithms," *IEEE Transactions on Energy Conversion* 1996, 11, 111–117.

[13] K.Y. Lee and J.G. Vlachogiannis. "Ant Colony Optimization For Active/reactive Operational Planning," World Congress, vol. 16, 2005.

[14] M.R. Kalli, I. Musirin, and M.M. Othman. "Ant Colony Based Optimization Technique for Voltage Stability Control," Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Power System, 2006.

[15] M.R. Kalli, I. Musirin, and M.M. Othman. "Optimal Transformer Tap Changer Setting For Voltage Stability Improvement," *International Journal of Power, Energy and Artificial intelligence* 2009, 1, 89–95.

[16] M.F. Mustafar, I. Musirin, M.R. Kalli, and M.K. Jebatan. "Ant Colony Optimization (ACO) Based Technique For Voltage Control and Loss Minimization Using Transformer Tap Setting," Proceedings of Research and Development 2007, 1–6, December 2007.

[17] H. Yoshida, K. Kawata, Y. Fukuyama, S. Takayama, and Y. Nakanishi. "A Particle Swarm Optimization For Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment," *IEEE Transactions on Power Systems* 2000, 15.

[18] K.S. Pandya and S.K. Joshi. "A Survey of Optimal Power Flow Methods," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 450–458.

[19] P.A. Jeyanthy and D. Devaraj. "Optimal Reactive Power Dispatch For Voltage Stability Enhancement Using Real Coded Genetic Algorithm," *International Journal of Computer and Electrical Engineering* 2010, 2, 734–740.

[20] A.P. Alves da Silva and P.J. Abrao. "Applications of Evolutionary Computation in Electric Power Systems," IEEE, 2002.

[21] J.G. Vlachogiannis and J. Ostergaard. "Reactive Power and Voltage Control Based On General Quantum Genetic Algorithm," *Expert Systems with Applications* 2009, 36, 6118–6126.

[22] H. Ying-Yi and L. Yi-Feng. "Reactive Power Control in Distribution System Using Genetic Algorithms," Proceeding of the 14th International Conference on Intelligent System Application to Power System, 2007, 44–50.

[23] R. Shivakumar, R. Lakshmipathi, and Y. Suresh. "Implementation of Bio Inspired Genetic Optimizer in Enhancing Power System Stability," *IACSIT International Journal of Engineering and Technology* 2010, 2, pp. 263–268.

[24] B. Mahdad, T. Bouktir, and K. Srairi. "Genetic Algorithm and Fuzzy Rules Applied to Enhance the Optimal Power Flow with Considerations of FACTS," *International Journal of Computational Intelligence Research* 2008, 4, 229–238.

[25] A. Salami. "Control of Capacitors in Distribution Networks Using Neural Network Based On Radial Basis Function," Proceeding of the 5th IASME/WSEAS International Conference on Energy and Environment, 2010.

[26] M.A.H. El-Sayed. "Artificial Neural Network Reactive Power Optimization," *Neurocomputing*, 1998.

[27] L. Chen-Ching and T. Kevin. "An Expert System Assisting Decision-making of Reactive Power/Voltage Control," *IEEE Transactions on Power Systems* 2007, 1, 195–201.

[28] A.K. Tajfar, M. Iravani, and R.K. Zare. "Cordinated Fuzzy Logic Voltage/Var Controller in Distribution Networks," IEEE International Conference on Industrial Technology, 2008, 1–5.

[29] R. Shivakumar, V. Miranda, and P. Calisto. "A Fuzzy Inference System to Voltage/Var Control in Distribution Management System," Proceedings of 14th PSCC, Seville, 2002, vol. 1, 1–6.

[30] A.M.A. Haidar, A. Mohamed, and A. Hussain. "Vulnerability Control of Large Scale Interconnected Power System Using Neuro-fuzzy Load Shedding Approach," *Expert Systems with Applications* 2010, 10, issue 4.

[31] S.A. Karzalis, A.G. Barkitzis, and V. Petridis. "A Genetic Algorithm Solution of the Unit Commitment Problem," *IEEE Transactions* 1996, PWRS 11, 83–90.

[32] G.B. Sheble and T.T. Maifeld. "Unit Commitment by Genetic Algorithms and Expert System," EPSR 1994, 30, 115–121.

[33] D. Dasgupta and D.R. McGregor. "Thermal Unit Commitment Using Genetic Algorithms," *IEE Proceedings* 1994, Part C 141 5, 459–465.

[34] R. Meziane, Y. Massim, A. Zeblah, A. Ghoraf, and R. Rahli. "Reliability Optimization Using Ant Colony Algorithm Under Performance and Cost Constraints," Electric Power Systems Research, 2005.

[35] M. Sasson. "Non-linear Programming Solutions For Load Flow, Minimum Loss, and Economic Dispatching Problems," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 1969, Pas-88.

[36] K.Y. Lee, Y.M. Park, and J.L. Ortiz. "A United Approach to Optimal Real and Reactive Power Dispatch," *IEEE Transactions on Power Systems* 1985, PAS-104, 1147–1153.

[37] H.W. Dommel and W.F. Tinney. "Optimal Power Flow Solutions," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1968, PAS.87, 1866–1876.

第 6 章　智能电网设计的路径

6.1　引言

智能电网的设计涉及工具、技术和方法[14]。本章将会介绍一些符合智能电网特征的计算工具和相关技术。我们也会开发支持智能电网发展的计算工具的相关算法。由于实时或准实时数据和信号的可用性大大增加，考虑电网的动态性和随机性[15]，有必要再次研究最合适的方法和技术。智能电网发展的障碍在于需要在现有的电力系统结构上进行开发。

6.2　智能电网发展的障碍和解决方案

图 6.1 描述了设计智能电网的多层次方法。这些层次包括[1,2]：

1）系统规划和维护；

2）电量竞价；

3）系统运行；

4）设备。

系统规划和维护层次：问题包括过多的决策者、当地居民反对新建电厂和线路、规划的不确定性、缺少实时的系统预测控制，以及对供电侧可靠性关注不够等[3,4]。

为了克服这些障碍，智能电网的设计需要用户能够实时获取电价信息，用于部署实时系统预测控制的税收激励，以及用于需求侧管理（DSM）技术的税收激励。具体方法包括：

1）建立和投资智能电网培训中心；

2）授权用户能够访问实时电价信息；

3）提供税收激励以部署实时的系统预测控制；

4）为 DSM 提供税收激励；

5）这些解决方案应该在实施层面实现维护成本的最小化。

电量竞价层次：问题包括对放松管制的公共抵制、用户不能获得足够的实时电价信息、缺少用户的参与（例如采用智能 DSM 技术），以及缺少环境信用额度和强制税费。解决方案包括：

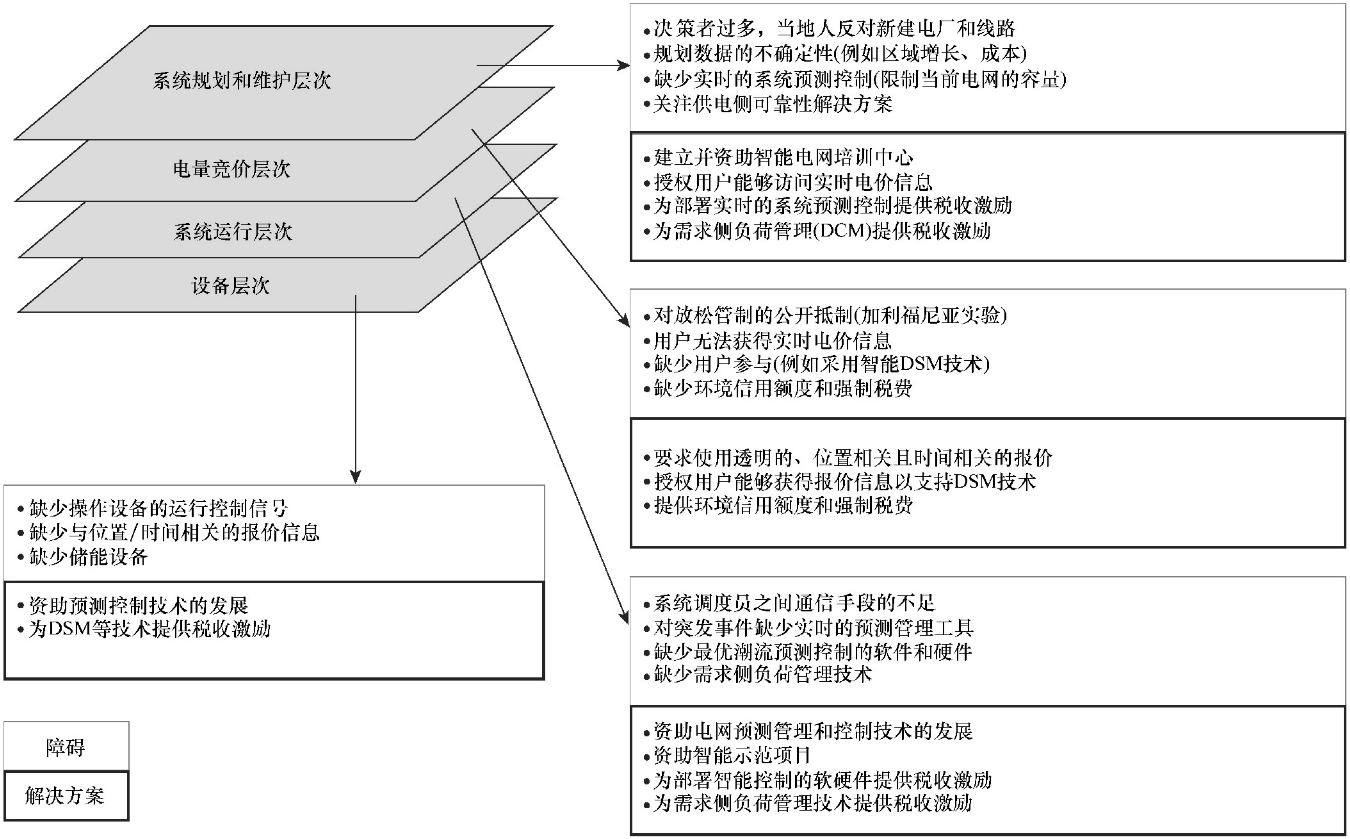


图 6.1　智能电网的障碍和解决方案

1）强制使用透明的、与位置及时间相关的报价；

2）授权用户能够访问报价信息，以支持 DSM 技术；

3）提供环境信用额度和强制税费。

电量竞价层次的目的在于为电力市场重新定义报价机制。为了使普通老百姓能够用得起电网，还有很长的路要走。

系统运行层次：问题包括处理紧急事故时系统调度员之间通信手段的不足、缺少高效处理事故的实时预测管理工具、缺少最优潮流预测控制软硬件，以及缺乏 DMS 技术。解决方案包括：

1）资助电网预测管理和控制技术的发展；

2）资助智能示范项目；

3）为智能控制软硬件的部署提供税收激励；

4）为 DSM 技术提供税收激励。

设备层次：问题包括缺少对操作设备的预测控制信号，缺少与位置、时间相关的报价信息，缺少储能设备。解决方案包括：

1）资助预测控制技术的发展；

2）为采用新技术提供税收激励；

3）为 DSM 技术提供税收激励。

6.3 基于先进的优化和控制技术的智能电网设计路径

电网是一种高度复杂的动态系统，在日常操作中会经受大量的扰动。由于天气或偶然事件引起的随机扰动很少会导致大范围的级联事故[6,10]。但是一旦能获得详细的实时运行数据，则可能为恶意设计的攻击打开方便之门。图 6.2 说明了 4 种先进的优化和控制技术，这些技术对于满足第 3 章所探讨的智能电网性能要求而言是十分必要的。

6.4 一般层次的自动化

该层次的自动化采用已探讨的计算技术和新的算法进行调度和机组组合优化，以确保：

1）可靠性；

2）稳定性；

3）最优调度；

4）在不同约束和不确定条件下的机组组合优化；

5）安全分析；

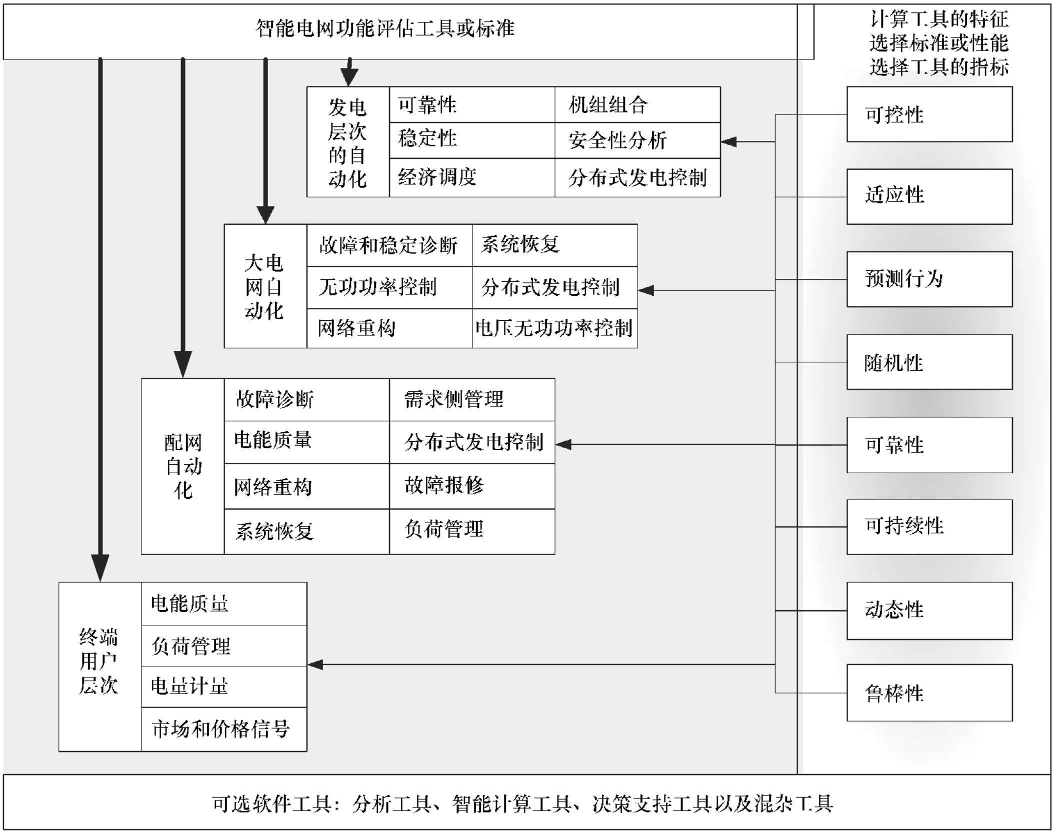


图 6.2　采用先进的优化和控制技术的智能电网

6）分布式发电控制。

必须把预测技术引入到实时运行和日常运行计划中。为满足峰荷需要，在长期的系统规划中需要准确、可靠地评估可用发电能力。必须把高质量的实时数据集成到现有的软件和实践活动中。应鼓励电力工业在这些领域从事研究和开发[1]。

6.4.1　可靠性

电力系统可靠性是指在可接受的标准范围内，把电能传输给所有电力用户的能力。传统的可靠性分析方法是确定性的方法，例如，如果系统能够在单点非计划停电条件下保持正常运行，则认为该系统是可靠的，即满足 n-1 条件[2]。但是在智能电网环境下，可靠性分析可能不适用于极端事件。因此，新的可靠性和可持续性度量标准应能处理：

1）系统参数的非线性，尤其是在出现了多种能源设备（如风电、储能、水电等）和大功率电力电子设备的情况下；

2）负荷需求和发电能力的不确定性，它们是时间和偶然事故的函数；

3）系统的动态性，可反映电力市场、自然资源的可用性、网络重构以及负荷控制；

4）系统参数的随机性，这是来自于不同时间尺度的人为或自然事件。

负荷失电概率（Loss Of Load Probability，LOLP）和预期损失电量（Expected Unserved Energy，EUE）可用于确定电量/负荷比，这些负荷可在不同的可靠性服务策略中保持供电。成本控制可平衡可靠性改善的成本和服务中断的成本。最终的目标是在考虑各种可能预想事故的条件下实现可靠性的最大化。自治控制可用于实现这个目标。

6.4.2 稳定性

电力系统稳定性是指大规模电力系统抵抗突然扰动的能力，这里的扰动包括短路故障和系统元件的非计划停运[3]。在发电层次，暂态稳定性是主要的考虑因素。随着系统规模的扩大，暂态稳定的重要性也不断增大。

一般来说，在系统发生故障或扰动后，需要进行电压和功角稳定评估以确保动态重构的成功。前面第4章所讨论的方法是传统的分析方法，包括风险评估和李雅普诺夫稳定性评估。由于稳定边界不能用数值方法获得，需要采用基于能量的方法评估功角稳定。通常采用传统方法解决稳定性问题，包括连续潮流法、奇异值分解法、雅克比条件数法以及能量边界法等。但是，所有这些方法都是基于离线研究的。

用于智能电网环境的广域量测系统（WAMS）和相量测量装置（PMU），要考虑系统在不同负载和未知事件下的实时评估。稳定性问题进一步研究的目标，是通过提出新的稳定评估指标来考虑预想事故的影响。

6.4.3 经济调度

经济调度是指在满足负荷和运行约束[4]的前提下，以成本最小化为目标，把包括可再生能源设备在内的总出力分配到不同发电单元中的计算过程。对任何具体的负荷条件，计算出每个发电厂的出力（包括发电厂内每个发电单元的出力），在满足整个系统负荷的同时实现燃料总成本的最小化[3]。传统上，经济调度问题可以表示为二次型目标函数的成本优化问题：

$$F(P_{\mathrm{g}}) = \sum_{i=1}^{N_{\mathrm{g}}} (\alpha_i + \beta_i P_{\mathrm{g}i} + \gamma_i P_{\mathrm{g}i}^2)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{g}}} P_{\mathrm{g}i} - \sum_{i=1}^{N_{\mathrm{D}}} P_{\mathrm{D}_1} + P_{\mathrm{loss}} = 0$$

$$\mathrm{s.t}\quad V_{\min} \leqslant V \leqslant V_{\max}$$

$$P_{\mathrm{gmin}} \leqslant P_{\mathrm{g}} \leqslant P_{\mathrm{gmax}}$$

约束条件包括等式和不等式，描述了功率平衡方程以及发电机、母线电压和线路潮流的限额。它可以用解析型数学规划方法求解，如非线性规划（NLP）、二次

规划（QP）、线性规划（LP）、牛顿法、内点法（Interior Point Method，IPM），也可以用决策支持方法求解，如 AHP。

用于求解这类问题的计算方法需要把目标函数简化成为分段线性和单调递增的。但是，电力系统的非凸特性使得优化问题可能出现局部最小或局部最优。因此，又提出了其他方法用于改善经济调度算法的性能，如进化规划（EP）[4]、遗传算法（GA）[5]、禁忌搜索[6]、神经网络[7]、粒子群优化[8,9]、自适应动态规划（ADP）等。

6.4.4　机组组合

机组组合（Unit Commitment，UC）是一种运行计划安排功能，有时也称为“预调度”。在整个发电单元管理的多层次结构中[10]，机组组合功能需要与经济调度、维护和出力计划安排相配合。机组组合计划安排需要给出从一天到一周的时间尺度内每个小时的电力系统运行决策。

机组组合决策的求解与具有抽水蓄能能力的水电机组的使用相关，它们相互配合以保证电力系统的可靠性。该问题的求解还涉及常规员工政策的劳动力约束，其中员工应该是可用的且无需支付加班费。另一个重要因素是在决策过程中需要考虑环境控制，例如燃料的替换。基于计算机的机组组合规划在电力公司中的应用一直比较缓慢，有以下原因：

1）机组组合规划软件不方便在各个系统之间移植。机组组合问题非常复杂，以致只有最重要的特征可以在机组组合规划软件中考虑，而这些特征对不同系统来说可能不同，因此机组组合规划软件需要定制。

2）一些政策问题、约束条件以及某些系统特性难于建模，很难用数学方法求解。

3）运行条件变化很快；系统要处理大量的客观和主观信息，这些复杂性对计算机调度程序而言极具挑战性。

4）正如其他计算机应用领域一样，开发出一个完全可用的系统一直是非常困难的，树立调度员对软件系统的信心也是很困难的。

安排机组组合计划需要考虑：

1）机组运行约束和成本。

2）发电和备用约束。

3）电厂启动约束。

4）网络约束。

机组组合问题的数学描述：为了考虑约束和随机性，建立机组组合的数学表达式需要几个假定。备用可分为旋转备用和冷备用，分别对应热备用锅炉和公式中的冷起动部分。需要满足的第一个约束是净出力必须大于或等于全系统负载与所需要的系统备用之和：

$$\sum_{i=1}^{N} P_{gi}(t) \geqslant \text{净需求} + \text{备用}$$

如果机组需要保留一定量的备用，上述约束必须随之修改：

$$P_{gi}^{\max} = P_{gi}^{\text{capacity}} - P_{gi}^{\text{reserve}}$$

$$\text{需求} + \text{损失} \leqslant \sum_{i=1}^{N} P_{gi} - \sum_{i=1}^{N} P_{gi}^{\text{reserve}}$$

$$C_{\text{cold}} = C_{\text{o}}(1 - e^{\alpha t}) + C_{\text{L}}$$

式中，C_{cold}为起动离线锅炉的成本；α 为机组的热时间常数；t 为时间（s）；C_{L} 为起动机组的劳动力成本；C_{o} 为起动冷却锅炉的成本；$C_{\text{banked}} = C_{\text{B}}t + C_{\text{L}}$，其中 C_{B} 为起动热备用锅炉的成本，t 为时间（s）。

对于智能电网，机组组合问题的数学表达式还需要考虑其他约束，包括不确定性、一些安全指标或脆弱性指标以及拥塞裕度。

对于考虑了随机变量约束和预测的机组组合问题，拉格朗日松弛法是其中一种经典的求解方法。当机组组合问题具有随机性时，随机优化方法是较好的求解方法。但是它的预测性不如自适应动态规划方法[13,14]。自适应动态规划能够处理离散系统，使用 IPM 等计算技术，具有能够处理随机性和动态性指标的特征。

6.4.5 安全性分析

电力系统安全性分析是要检测电力系统是处于安全状态还是警戒状态。安全状态是指负荷需求能够满足，而且在当前运行条件以及出现无法预料的突发事件时不会越限。警戒状态是指可能会发生越限或者负荷需求无法满足，需要采用校正措施使系统重新回到安全状态[10]。

动态分析是评价系统从突发事件前到突发事件后时间段内的状态转变。可以采用动态安全函数来分析系统的动态安全性，或者同时考虑预防控制措施[11-13]。传统上采用 $N-1$ 安全分析方法来评价系统在突发情况下仍能保持向负载供电的能力。

采用人工智能和 NP 的组合法能够改进安全性评估，因为它可以考虑数据的随机性。安全性的度量指标基于实时的量测数据。例如，一种评价系统性能的新指标是系统的脆弱性，它基于负荷损失指标、电压指标以及潮流指标。

6.5 输电层次中智能电网的大型电力系统自动化

为了实现输电系统的自愈性和可持续性，大型电网各种功能的自动化是非常重要的。相关功能及其相应的智能技术如下：

1）基于智能数据的实时功角和电压稳定，系统崩溃检测和预防；

2）基于智能协调控制的无功功率控制；

3）基于智能倒闸操作的故障分析和重构方案；

4）基于智能倒闸操作和最小化供电中断的发电和负载平衡；

5）基于分布式能源（DR）削峰填谷策略的分布式发电（DG）和需求侧管理（DSM），也包括不断增长的可再生能源（RER）及其控制。

这些功能的集成如图6.3所示。一些功能将会在后面介绍。

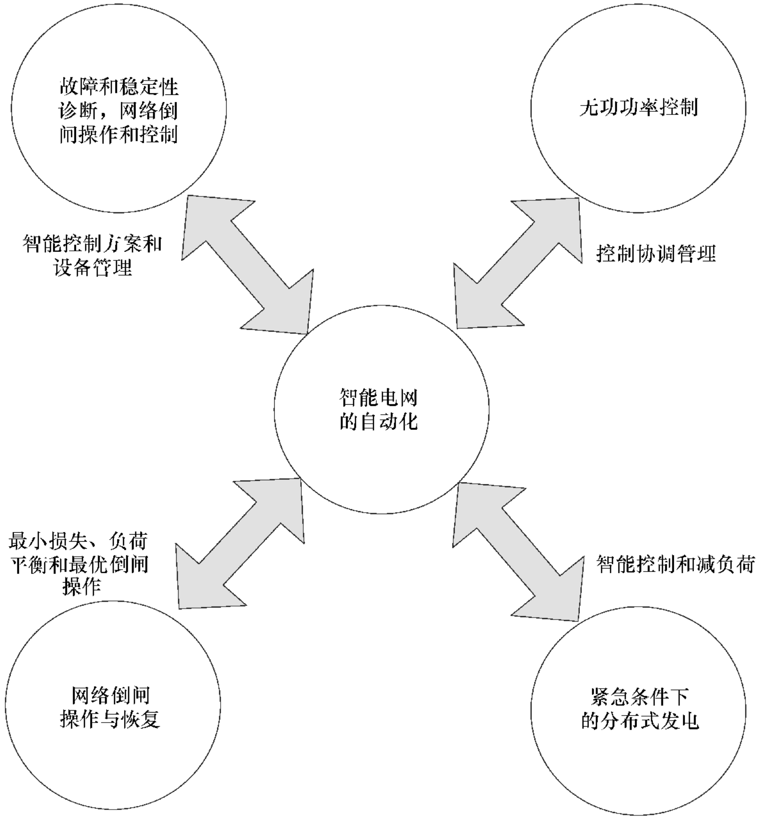


图6.3　智能电网的自动化

6.5.1　故障和稳定性诊断

电压和功角稳定评估可以确保在系统故障和大扰动后进行动态重构。由于稳定裕度不能采用数值方法得到，因此对功角稳定提出了一种基于能量的方法。到目前为止，实时评估系统在不同负荷条件和突发事件下的稳定性仍然没有实现。用于故障分析的技术包括基于电路理论的方法和基于行波的方法。检测电压失稳的方法一般仅仅基于电压的本地量测，例如低压减载（UVLS）。广域测量（WAM）和相量测量装置（PMU）在稳定监视和分析中也发挥着重要的作用。

6.5.2　无功功率控制

导致失稳的主要因素是电力系统不能满足无功功率的需求。问题的核心通常是

有功和无功功率流过输电网中的感性电抗时所产生的电压跌落[14]。无功功率控制采用优化技术实现网损的最小化，同时调度无功功率源以消除电压下降。具有有功功率裕度约束的优化问题可以采用基于 DSOPF 的智能优化技术进行实时求解。

诸如网络倒闸操作和恢复等其他功能，采用基于知识的系统，如遗传算法（GA）和模糊逻辑，选择停运机组和线路以及适当的控制措施。对于停运安排，自适应动态规划以及其他进化规划方法的变体（如遗传算法和蚁群算法），适于解决可再生能源接入智能电网所带来的随机性和波动性问题。

6.6 配电系统自动化需求

配电自动化和控制用于把电能传输给用户的环节。图 6.4 描述了配电系统自动化的方案。

智能配电解决方案的设计目的是最小化网损、减少供电中断以及优化分布式智

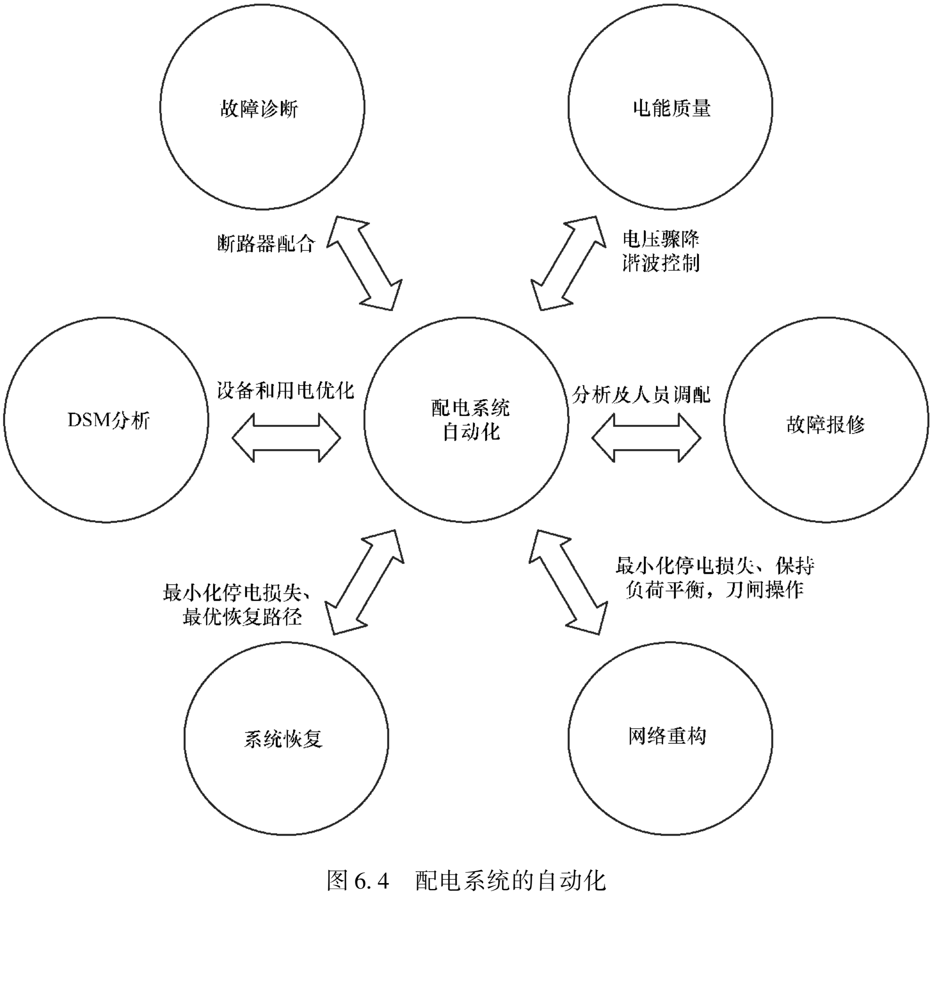


图 6.4　配电系统的自动化

能电网元件，如新型电源、储能设备和插电式混合动力电动汽车（PHEV）的充电设施。

为了可靠地集成大规模的间歇性电源，接入大型的发电、用电联营体也是很重要的。随着间歇性电源比例在区域的不断增加，所导致的波动性仅靠现有的传统电源可能难以控制。基荷出力[15]需要响应这种变化而做周期性波动，这将导致可靠性问题和经济性问题。智能配电会有助于削减传统发电的最大出力，因其可以高效地利用非高峰时段、能量有限的电源。

6.6.1　电压无功功率控制

在一定限制范围内的电压控制和电容器投切是一种降低网损、改善电压断面、延迟末端电网建设的有效方法，可满足电网可靠性要求和电能质量约束。

电压无功功率控制考虑了配电网运行的三相不平衡、分布式电源以及大系统的控制设备。在配电网自动化中，使用电压无功功率控制的功能需要在整个决策过程中保持适当的沟通以合理部署电容器，从而实现成本效益。

电压无功功率问题的数学公式：需要把电压无功功率控制与负荷管理综合起来考虑以提高效率。目标函数为：

1. 用户停电成本

$$\text{最小化停电成本} = \sum_{i} (X_{ik} \cdot PC_{ki} \cdot CC_k)$$

式中，X_{ik}为 i 母线上第 k 类负荷的减负荷水平（p. u.）；PC_{ki}为 i 母线上第 k 类负荷的最大减负荷量（MW）；CC_k 为第 k 类负荷的减负荷成本（美元/MW）。

2. 损失最小化

损失最小化目标函数可由下式表达：

$$\text{MinI}^2\text{r} = \sum_{ij} r_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{|V_i|^2}$$

3. 负荷平衡

$$\text{Max} \frac{S_i}{S_{i\max}}$$

式中，N 为母线总数；P_{ij}、Q_{ij}为支路 $i-j$ 之间的转移功率（p. u.）；V_i 为母线 i 的电压（p. u.）。

4. 多目标函数

$$Z = \text{Min}[a + b - c]$$

系统运行约束包括：

1. 支路潮流方程

$$Y_{i+1} = f_{i+1}(Y_i)$$

式中　$Y_i = [P, Q, |V|^2, X_k, Q_s, \delta_i]$

支路潮流考虑了辐射状结构配电网中一系列相邻节点之间的递归关系。P_D、Q_D 中有部分负荷可中断，这就是负荷管理的控制选项 X。另外，无功功率方程中有无功功率容量切换选项 Q_s。

2. 电压、电流约束

电压和电流约束条件可表示为

$$|V_i^{\min}| \leqslant V_i \leqslant |V_i^{\max}|$$

$$|I_{ij}^{\min}| \leqslant I_{ij} \leqslant |I_{ij}^{\max}|$$

3. 电容器控制约束

$$Qs_i^{\min} < Qs_i \leqslant Qs_i^{\max}$$

4. 减负荷控制约束

$$P_i \times X_{ki} \leqslant Pc_{ki}$$
$$Q_i \times X_{ki} \leqslant Qc_{ki}$$

6.6.2　电能质量

电能质量是指系统运行时不会对负荷和设备产生扰动或破坏的能力。电能质量需要重点关注，因为现代控制装置和数字化设备对电压畸变或电能质量的退化非常敏感。保持电能质量的基本要求是实现供电和用电的平衡。用于电能质量度量的典型指标包括：

1）电压瞬态冲击；

2）电压骤降；

3）总谐波畸变；

4）闪变系数。

全球电力工业所使用的电能质量度量的完整指标如表 6.1 所示。

表 6.1　典型电压质量指标

指标	计算公式	参数	应用场合
电压骤降/骤升	$\Delta V = \|V_i - V_{nom}\|$	V_i—i 母线电压 V_{nom}^-—额定电压	远端系统故障
闪变系数	$FF = \frac{\Delta V}{\|V\|}$	V—电压	间歇性负荷 电动机起动 电弧炉
总谐波畸变(THD)	$\mathrm{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{\infty}(I^{(i)})^2}{I^{(1)}}}$ $\mathrm{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{\infty}(V^{(i)})^2}{V^{(1)}}}$	$I^{(i)}$—i 次谐波电流 $V^{(i)}$—i 次谐波电压	非线性负荷 系统谐振

配电网中几个常用的电能质量标准在“Voltage Disturbances Standard EN 50160：

Voltage Characteristics in Public Distribution Systems（电压扰动标准 EN 50160：公共配电网电压特性）” 中详细列出。实时的电能质量研究有以下重要方面[13]：

1）电力系统扰动的灵敏检测；

2）电力系统扰动信号参数的实时测量；

3）电力系统扰动的量化以及对电力系统的负面影响分析；

4）扰动类型识别和扰动原因辨识；

5）扰动位置辨识。

在智能电网中，将使用实时数据对电能质量进行在线监测和分析。

6.6.3　网络重构

基于成本的网络重构评估策略可解决如下问题：

1）电力系统参数的非线性；

2）负荷管理和可用出力的不确定性；

3）系统动态性；

4）系统参数的随机性。

智能控制方法包括自适应评价设计、模糊逻辑和人工神经网络方法，可以为通用问题的数学建模提供自适应的、考虑随机性的解决方案。

6.6.4　需求侧管理

需求侧管理（Demand-Side Management，DSM）是一种通过调整负荷需求从而降低运行费用的有效方法。运行费用的很大一部分来自于昂贵的发电机组，而需求侧管理可以延迟电厂的扩容。需求侧管理还可改善环境，能够以最小的成本实现工业的可持续化发展。此外，需求侧管理还能够降低化石发电的有害气体排放以及降低发电成本，提高供电可靠性。需求侧管理功能有以下几种选项：

1）错峰；

2）填谷；

3）削峰；

4）储能。

这些选项对负荷曲线都有全面的影响。对配电网自动化功能，需求侧管理可以分为以下三类：

1）直接负荷控制[12]：通过通信系统（如电力线载波或微波通信），从电网向用户发送对负荷、小机组和储能设备的直接控制信号。

2）本地负荷控制：用户能够自动调整负荷以限制峰荷需求，例如，按需动作的断路器、负荷互锁装置、计时器、温度调节装置、人体传感器、热电联产供热、蓄冷等。

3）配电负荷控制：电力公司通过发送实时电价控制用户负荷。

6.6.5　分布式发电控制

无论是配电网还是大规模输电网，都需要更为综合性的规划方法，例如对大规模系统采用概率方法。随着间歇性分布式电源（如配电网中的本地风电场和屋顶太阳能）的增多，这种方法变得更为重要。间歇性分布式电源聚合起来可被视作接入输电网的可变电源。要注意的问题包括预测、故障恢复、电压穿越、安全性、无功功率、可观测性以及可控性等[11,14]。改进系统规划需要标准化的、不保密的、非私有的潮流和稳定模型，并适当考虑新型间歇性电源。应鼓励间歇性电源制造商支持这些模型的研发。

6.7　智能电网的终端用户/家用电器层次

在终端用户层次，计量和监视发生了巨大的改变。需求侧管理和需求响应是两个基本的自动化功能，它们将会在终端用户和家用电器层次得到进一步增强。需求侧管理把用户作为电力公司计划编制的选项之一。通过获得发电侧出力和需求侧减负荷的最优组合，可实现包括需求侧管理的整体系统成本的最小化。需求侧管理的分析采用了日前负荷曲线或数学规划等技术。需求侧管理已经在很多场合得以实施，包括机组组合、最优潮流、减负荷预测方法、用户侧可中断负荷管理、测量方法（数据收集）和动态规划等，以实现电力公司对电能采购和负荷管理的优化。

集成先进的移动式供电恢复设备、储能设备和调峰设备将不可避免地需要开发新的标准，以实现多种设备之间的协调、通信和互操作，并支持以竞价获得最优电价。这些都是急需关注的研究课题。

6.8　自适应控制和最优化方法的应用

在智能电网的设计框架中，自适应控制和最优化方法有几个潜在的应用。在计划编排的调整和控制策略中，考虑电力系统的随机性、动态性和互耦性是非常重要的。传统方法在处理这些问题时常常陷入维数灾难，而启发式方法往往得不到最优解。因此，系统的随机性、动态性、互耦性可能导致不稳定、不可行和非最优的解。

在随机动态最优潮流中，通常采用基于行为网和评价网的两阶段最优化方法，以实现：

1）对复杂系统的多目标的、时间相关的最优化；

2）考虑电厂或系统技术约束的最优化计划编排；

3）适应电力系统时变的动态扰动；

4）适应变化的随机噪声、不确定性，以及不完整的或错误的量测数据；

5）适应系统结构的变化，区分可观测和不可观测的量测。

6.9 小结

本章探讨了电网预测管理和控制技术的发展，以及通过部署智能控制软件和硬件提高智能电网的性能。用户和各利益相关方都会从中受益[14,15]。对于设备运行中缺乏预测控制信号以及缺乏储能设备等问题本章也做了描述。为了部署、运行和维护新的电网基础设施，本章建议在可再生能源、储能技术以及新的软件和控制技术的集成方面开展研究。

参考文献

[1] "Accommodating High Levels of Variable Generation," North American Electric Reliability Corporation, 2009.

[2] J.A. Momoh and M.E. El-Hawary. *Electric Systems, Dynamics and Stability with Artificial Intelligence Applications*. New York: Marcel Dekker, 2000.

[3] A.J. Wood and B.F. Wollenberg. *Power Generation, Operation and Control*. New York: John Wiley & Sons, 1996.

[4] H. Yang, P. Yang, and C. Huang. "Evolutionary Programming Based Economic Dispatch with Non-Smooth Fuel Cost Functions," *IEEE Transactions on Power Systems* 1996, 11, 112–118.

[5] D.C. Walters and G.B. Sheble. "Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch With The Valve-point Loading," *IEEE Transactions on Power Systems* 1993, 8, 1325–1332.

[6] W.M. Lin, F.S. Cheng, and M.T. Tsay. "An Improved Tabu Search For Economic Dispatch With Multiple Minima," *IEEE Transactions on Power Systems* 2002, 17, 108–112.

[7] K.Y. Lee, A. Sode-Yome, and J.H. Park. "Adaptive Hopfield Neural Network For Economic Load Dispatch," *IEEE Transactions on Power Systems* 1998, 13, 519–526.

[8] R.C. Eberhart and Y. Shi. "Comparing Inertia Weights and Constriction Factors in Particle Swarm Optimization," Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation, 1, 84–88.

[9] R.C. Eberhart and Y. Shi. "Particle Swarm Optimization: Developments, Applications, and Resources," Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation, 1, 81–86.

[10] OSI. Smart Grid Initiatives White Paper: Revision 1.1.

[11] A.K. Al-Othman, F.S. Al-Fares, and K. M. EL-Nagger. "Power System Security Constrained Economic Dispatch Using Real Coded Quantum Inspired Evolution Algorithm," *World Academy of Science, Engineering and Technology* 2007, 29, 7–14.

[12] R.B. Alder. "Security Consideration Economic Dispatch With Participation Factors," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 1977, PAS-96.

[13] M. El-Sharkawy and D. Niebur. "Artificial Neural Networks With Application to Power Systems," IEEE Power Engineering Society, A Tutorial Course, 1996.

[14] F.F. Wu, J.H. Chow, and J.A. Momoh, Eds. *Applied Mathematics for Restructured Electric Power Systems: Optimization, Control, and Computational Intelligence*. Springer Science and Business Media, Inc., 2005: pp. 11–24.
[15] T. Lin and A. Domijan. "On Power Quality Indices and Real Time Measurements," *IEEE Transactions on Power Delivery* 2005, 20, 2552–2562.

推 荐 阅 读

P. Kundur. *Power System Stability and Control*. Washington, D.C.: McGraw-Hill Inc., 1994.

第 7 章　可再生能源与储能

7.1　可再生能源

可再生能源包括风能、光伏、太阳能、生物能以及燃料电池等。在智能电网的设计与开发中，需要建立这些可再生能源的模型、分析其不同渗透率对现有电网的影响。智能电网发展路线图展示了一副在不久将来系统中广泛部署分布式能源（DER）的图景。美国对可再生技术的定位为既可以降低对外来石油的依赖，又可以减少能源生产对环境的影响[1]。可再生能源及其接入问题引发了一些新的课题，比如，如何提高能源利用的效率与可靠性，如何利用新技术跟踪和应对可再生能源的波动性。

为了达到最优的可靠性、安全性和经济性目标，智能电网架构设计中还必须对分布式能源的接入方式、容量和布局等进行最优规划。另外，需要研究快速算法和高速计算技术，对波动性强的电源出力进行实时预测并建立准确的估计模型。目前所面临的挑战和亟待解决的技术问题包括能量变换、储能、插电式混合动力电动汽车（Plug-in Hybrid Electric Vehicle，PHEV）等，本章将逐一讨论。

7.2　智能电网中可利用的可持续能源

可持续能源是指自然界中可以循环再生、永续利用的能源。这类能源包括太阳能、风能、水能、生物能以及地热能等。由于它们具有广为社会接受的环境友好特性，故也被称为绿色能源。

快速接纳多种替代能源发电形式应是未来电网的特征[3,4]，并应成为国家重点发展项目。为此，在满足互联标准和运行约束的前提下，需要对能源结构进行重新优化。好在现有电网在设计之初已对此有所考虑。可再生能源会给电网带来稳定性、可靠性、经济性等方面的影响，这在为电网开发技术和经济类软件时应引起足够重视。

各种可再生能源技术将给智能电网带来如下变化：

1）实现可再生能源的远距离利用和存储。

2）增强并网型可再生能源系统（Renewable Energy Systems，RES）的功能：

a）促进能量在可再生能源系统与电网间的双向流动；

b）对并网型可再生能源系统发出的多余电能进行重新分配；

c）利用位于用户侧的后备储能技术，存储电网和可再生能源系统发出的电能；

d）记录源、网之间的双向功率流动，用于计费和研究。

3）完善电动汽车和 PHEV 的功能。

4）利用电动汽车车载电池组作为储能装置。

下面介绍智能电网中常用的可再生能源技术。

7.2.1 太阳能

1839 年法国物理学家埃德蒙·贝克勒尔发现利用光伏电池可以获取太阳能。这项技术既可以利用单块太阳电池板，也可以利用一组电池板或者大量的电池板阵列。太阳能光伏在运行时不存在排放问题，运行可靠且所需维护费用极少。

太阳能开发中需考虑如下问题：

1）日射量：可以转换为电力的太阳能。日照水平受光伏电池运行温度、发光强度（与地理位置相关）、太阳电池板位置（最大功率跟踪）等因素的影响。

2）排放：光伏的排放水平应达到环保要求㊀。

为提高光能转换效率，光伏电池的材料一般采用单晶硅、多晶硅、碲化镉、微晶硅、铜铟硒等。

7.2.2 太阳能发电技术

为了提高光伏输出，太阳能发电技术利用透镜、反射镜和光照跟踪系统将大面积阳光进行集束。诸如槽形抛物面集热器、塔式太阳能电站等都应用了这种技术[12]。

由于新型材料制造技术的发展，生产厂家可以不断降低光伏安装成本。目前主要的工作集中在光伏材料制备和新材料开发方面。基本材料包括单晶硅和多晶硅板、浇铸多晶硅，此外还有非晶硅以及由非晶硅、铜铟硒（CIS）、碲化镉（CdTe）等半导体薄膜涂层制成的薄膜板。这种薄膜涂层工艺的应用降低了生产光伏板的工时和成本，虽然其光能转换效率也降低了，但是应用领域更为广泛。

7.2.3 光伏系统建模

现有的几种光伏仿真软件采用的是时间序列分析法，如 PV-DesignPro[5]。模型的输入量一般包括一年内每小时的太阳直射辐射照度、温度以及风速等。例如：TMY㊁数据、光伏阵列的几何构型，以及其他光伏系统和系统平衡（BOS）参数。大多数模型都是为了计算单个光伏电池或光伏列阵的输出功率。由于光伏发电系统

㊀ 光伏系统的排放主要指光伏电池在生产、封装、集成安装等过程中直接排放的温室气体，以及所耗电能的等价碳当量。——译者注

㊁ TMY 的全称 Typical Meteorological Year（典型气象年）。——译者注

能量转换效率和采用技术的不同，光伏系统的输出功率受到环境条件和所选模型的影响。常采用单个光伏电池的 $I-V$ 特性曲线建立光伏系统的模型。模型描述如下：

$$I = I_{sc} - I_{os}\left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1\right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

$$I_{os} = AT^{\gamma} e^{\left(\frac{-E_g}{nkT}\right)}$$

$$I_d = I_{sc} - I_{os}\left(e^{\left(\frac{q}{nkT}E_d\right)} - 1\right)$$

对于 $N_s \times N_{sh}$ 光伏列阵：

$$I_d = \frac{I_{d_mod}}{N_{sh}}$$

$$E_{d_mod} = E_d \times N_s$$

$$R_{s_mod} = R_s\left(\frac{N_s}{N_{sh}}\right)$$

$$R_{sh_mod} = R_{sh}\left(\frac{N_s}{N_{sh}}\right)$$

式中，I 为光伏电池输出电流（A）；I_{sc} 为短路电流（A）；I_{os} 为饱和电流（A）；s 为太阳辐照强度（kW/m^2）；q 为电子电量常数（1.6×10^{-19}C）；k 为玻尔兹曼常数（1.38×10^{-23}JK^{-1}）；T 为 PN 结表面温度（K），t（℃）；n 为二极管品质因子；A 为温度常数；γ 为温度依赖性指数；E_g 为能隙宽度（eV）；V 为光伏电池输出电压（V）；V_{oc} 为光伏电池开路电压（V）；R_s、R_{s_mod} 为光伏电池和光伏模块串联电阻（Ω）；R_{sh}、R_{sh_mod} 为光伏电池和光伏模块并联电阻（Ω）；E_d、E_{d_mod} 为理想光伏电池和光伏模块电压（V）；I_d、I_{d_mod} 为理想光伏电池和光伏模块电流（A）；N_s 为光伏模块串联光伏电池个数；N_{sh} 为光伏模块并联光伏电池个数；V_{out} 为光伏模块电压（V）；I_{out} 为光伏模块电流（A）；R 为连接负载电阻（Ω）。

光伏组件输出功率也可以等效表示为

$$P_{mp} = \frac{G}{G_{ref}} P_{mp,ref}[1 + \gamma(T - T_{ref})]$$

式中，G 为实际太阳辐射照度；P_{mp} 为光伏组件最大输出功率；$P_{mp,ref}$ 为标准测试条件下光伏组件最大输出功率；T 为温度；T_{ref} 为标准测试条件下的温度（25℃）；G_{ref} 为标准测试条件下的太阳辐射照度（1000Wm^{-2}）；γ 为功率温度系数。

光伏组件的输出功率随着辐射强度和电池表面温度而变化。光伏阵列安装地点的辐射强度可以根据历史统计数据进行预测，这些统计数据可以通过当地或有着相似辐射强度地区的气象数据估计得出，或通过分析太阳能图谱和数据库而得到[7]。太阳光强度的随机性可以通过高斯和 Beta 密度函数来描述。

电力电子变换技术

并网型光伏系统通过逆变器将光伏电池发出的直流电变换为交流电（见图

7.1)。

在智能电网中为了更好地吸纳太阳能，还需对光伏发电的波动性和电力电子变换技术做进一步研究。通常采用 Beta 和 Rayleigh 等密度函数对光伏系统出力进行建模。基于模糊算法和遗传算法的功率跟踪技术能够实现更为有效的最大功率跟踪。光伏电厂的选址和规模的决策可以采用经典或现代智能优化方法。

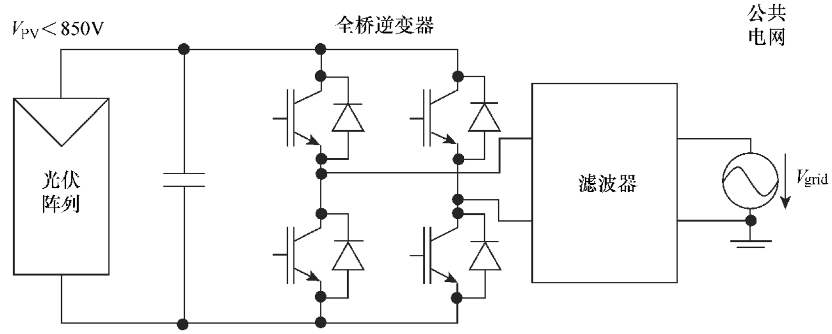


图 7.1　光伏的直-交逆变系统

7.2.4　风电机组系统

风能是世界上发展最快的可再生能源类型之一（见图 7.2），这是因为风电机组费用可以承受，而且又不需为输电线路等基础设施建设投资过多。风力发电机由转子、发电机、桨叶和驱动或耦合装置组成。与光伏发电相比，风能在经济性上更具竞争力。

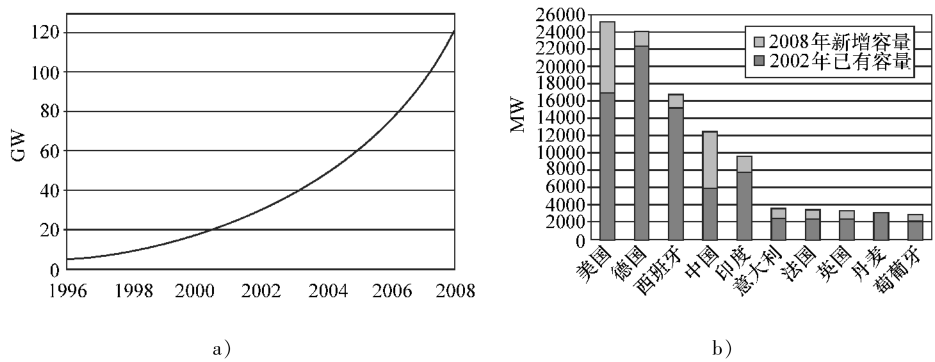


图 7.2　1996~2008 年世界风电容量（图 a）和 2008 年风电容量前 10 国家（图 b）

表 7.1 列出了不同风力发电机的配置参数。风速和柱上机组的安装高度都会影响风力发电机的出力。

尽管风力发电机不产生二氧化碳和其他污染物[9]，风力发电仍存在三点不足：风力发电机的出力是不可控的；风电场需配备调峰装置；只有当风力充足时才会有功率输出。

风力发电机建模：电机消耗无功功率，同时发出有功功率。风力发电机的机械输出功率为

$$P_{\mathrm{m}} = \frac{1}{2}\rho \cdot \pi R^2 \cdot V^3 \cdot C_{\mathrm{p}}$$

式中，ρ 为空气密度（$\mathrm{kg/m^3}$）；R 为风力发电机叶片半径（m）；C_{p}为风力发电机的风能利用系数；V 为风速（m/s）。

风力发电机的电功率为

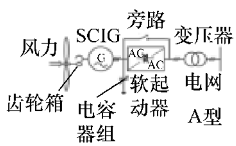
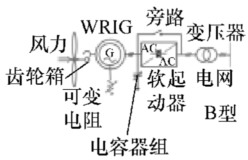
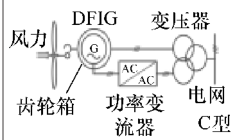
$$P_{\mathrm{e}} = n_{\mathrm{o}} P_{\mathrm{m}}$$

式中　　$n_{\mathrm{o}} = \eta_{\mathrm{m}}\eta_{\mathrm{g}}$

式中，η_{m}和 η_{g}分别为风机和发电机的效率。

风能具有随机性，通常利用概率方法进行建模，常用的概率密度函数包括高斯、Beta 和瑞利（Rayleigh）函数。风能利用的另一个挑战在于阻塞管理。由于风能的时变和随机特征，常采用诸如遗传算法、人工神经元网络以及模糊逻辑及其混杂方法对风能进行合理规划和调度，以满足实时的供需平衡。算法的过程包含获得实时测量数据，根据系统状态、位置和网络限制来定义新的算法。

表 7.1　风力发电机建模

类型	A：定速风力发电机	B：含转子可变电阻的变速风力发电机	C：采用非全功率变流器的变速风力发电机	D：采用全功率变流器的变速风力发电机
结构				
发电机类型	笼型感应发电机(SCIG)	绕线转子感应发电机(WRIG)	双馈感应发电机(DFIG)	电励磁[绕线转子同步发电机(WRSG)或永磁励磁型,即永磁同步发电机(PMSG)]
无功功率补偿方式	从电网吸收无功功率,必须安装电容器组	利用电容器组进行无功功率补偿,同时通过软起动方式平滑并网	利用电力电子变换器进行无功功率补偿并平滑并网	利用电力电子变换器进行无功功率补偿并进行并网
关键特性	风速波动会导致机械功率波动,并进一步导致电功率波动; 不支持任何调速控制;机械结构必须足够支撑由阵风导致的机械应力; 输出的有功功率有限	通过在转子中串入额外的可变电阻来使得整体转子电阻大小可控,可变电阻的大小由安装在转轴上的光控变换器控制		全变速控制风力发电机,发电机通过全功率变流器接入电网

7.2.5 生物质-生物能

生物能是从谷物、小麦、大豆、木材以及生物残体等有机物中，通过产生化学物质和其他成分而获得的能量。通过生物质气化过程，经由燃气轮机可将生物能转化为电能。生物质还能被直接转化成液态燃料，如乙醇、酒精或从玉米酒精提取的生物柴油等。

生物质电厂已经达到了11GW的装机容量，并在美国市场上得到了应用。生物质发电通常采用填埋气体和农林废物，发电容量从0.5GW到3.0GW不等。生物质能在发展中国家历来用于家庭烹饪和取暖。只有当生物原材料充足，并且能量转换易于进行时，生物能才适合于发电。发电过程中会产生二氧化碳和其他排放物。生物能的实时调度和分配策略要想取得令人满意的效果，需要借助新的系统理论，以保证模型的稳定性。

7.2.6 小型与微型水电

水力发电是目前人类利用最为广泛的可再生能源[8]。小型水电的装机容量一般在100kW～30MW之间，而微型水电的规模则低于100kW。由于水流波动，小型水电利用感应电机作为发电机，构成变速发电系统。水轮机将水能转变为旋转机械能。

从增强智能电网的意义上，小型和微型水电是可再生能源的最佳选择。有关可靠性与建模问题可以参考前面光伏和风力发电的相关内容。计算智能同样可以用到小型和微型水电的性能研究和机组组合研究中来。

7.2.7 燃料电池

燃料电池同样可用于提高智能电网的电能传输能力。它所需要的燃料直接来自于氢气、天然气、甲醇以及汽油等。燃料电池直接将燃料的化学能转变为电能，因而不受卡诺循环的限制，其燃料-电能转换效率可高达65%。由于燃料利用率高，所以燃料电池非常环保。依据电解质的不同，燃料电池分为磷酸型燃料电池（PAFC）、质子交换膜燃料电池（PEMFC）、熔融碳酸盐燃料电池（MCFC）、固体氧化物燃料电池（SOFC）、碱性燃料电池（AFC）、再生燃料电池以及陶瓷膜燃料电池（Botanic Ceramic Fuel Cell，PCFC）等。与常规发电形式相比，燃料电池几乎不存在排放，但其发电成本却要高得多。

燃料电池的结构是层叠电池单元的堆栈（stack），每个电池单元包括正负电极和电解质材料。天然气精炼厂利用汽油精炼过程中获得的丙烷实现大规模制氢，使燃料电池得以商业化运行。

燃料电池的排放极低，所以对环境几乎不产生影响。能量转换的高效性使得燃料成本很低，而由于运行时不存在转动部件，所以维护成本也极低。它们几乎不存在诸如CO_2等污染物排放。所以燃料电池堪称一种绿色、优质的电力。另外，它们还可以提供中高级别的余热输出，因而很适合于热电联供（CHP）系统。但是，

由于其高昂的资金成本，使得燃料电池不适合用作调峰电力。

燃料电池的能量转换效率在 40% ~80% 之间。磷酸型燃料电池和质子交换膜燃料电池是两种常用的燃料电池。其中，前者工作温度相对较高，需要外部水冷系统以冷却电池堆。而后者的工作温度较之绝大多数其他类型的燃料电池都要低，而且，它不含有酸性液体等化学物质，也无需溶解池，这使得在制造材料方面无需特殊考虑。

7.2.8　地源热泵

地热发电是利用地下数英里处热井中的蒸汽或热水作为动力源的一种发电形式。其基本原理与常规汽轮机发电类似，即抽取地下热水推动汽轮机做功，继而驱动发电机发电，实现从地热能到电能的转换。用过的热水会被回灌到地下以补充地下水，这样整个能量变换过程可以持续进行。地热发电站有多种类型，包括干蒸式、闪蒸式以及双循环发电。其中，干蒸式发电站直接利用地热井喷出的饱和蒸汽送入汽轮机驱动发电机发电；而后面两种则利用地热井涌出的热水，通过闪蒸系统或双循环系统发电。

在美国，地热发电主要集中于加利福尼亚、犹他州、内华达和夏威夷。地热能的利用方式和领域有多种，典型的包括热泵、农业、渔业、畜牧业以及食品加工等。地热项目在勘探、开采等环节都需要大量的先期投资。对于地热发电站项目，还需进行勘探风险和环境影响评估。

7.3　可持续能源利用中的渗透率与波动性问题

可再生能源在电网中的渗透率依地理位置而变化，主要取决于当地的环境条件是否能保证其功能的正常实现。渗透率可以量化为

$$\text{渗透率} = \frac{\sum_{\forall i} P_{\mathrm{DG},i}}{\sum_{\forall j} P_{\mathrm{demand},j}}$$

可再生能源技术的选择和实现受到其能源波动性的限制，如太阳能和风能。对于太阳能来说，太阳辐射强度的变化是时间、地点、海拔、当地气象条件以及遮光处理程度的函数。光伏发电的波动性是太阳辐射强度的函数，可以通过 Beta 分布建模获得。利用地点和时间的历史数据计算 Beta 模型的参数的方程为

$$\alpha = \mu\left(\frac{(1-\mu)\mu}{\sigma} - 1\right)$$

$$\beta = (1-\mu)\left(\frac{(1-\mu)\mu}{\sigma} - 1\right)$$

相应的概率密度分布函数如下：

$$f(s_i)=\frac{s_i^{\alpha-1}(1-s_i)^{\beta-1}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}\Gamma(\alpha+\beta)$$

显而易见的是，导致风力发电技术波动性的来源有三方面：风速的随机性和波动性；当风速超过允许的最大风速上限时，需要停止风机以防止风力发电机损坏；当风速小于切入风速时，风力发电机无功率输出。从 1978 年以来，人们就采用威布尔（Weibull）模型来研究风速分布，该模型模拟了不同情况下风速的变换趋势。其概率密度函数为

$$f(V)=\begin{cases}\dfrac{k}{\lambda}\left(\dfrac{V}{\lambda}\right)^{k-1}\exp\left(\dfrac{V}{\lambda}\right)^{k}, V\geqslant 0\\ 0, V<0\end{cases}$$

风速的均值和方差可由其形状和尺度参数计算得到

$$\mu=\lambda\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)$$

$$Var=\lambda^2\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right)-\mu^2$$

利用位置和时间的历史统计数据，可以计算出风速的均值与方差，然后利用下式即可得到威布尔分布的模型参数：

$$k=\left(\frac{\sigma}{\overline{V}}\right)^{-1.086}$$

$$\lambda=\frac{\overline{V}}{\Gamma\left(1+\left(\frac{1}{k}\right)\right)}$$

还有一种常用的模型是瑞利分布函数，它是威布尔模型的特殊情况，其模型中仅包含一个可调节参数，从而降低了模型的复杂性。但此函数只在风电场的风速参数并不精确时才可用[2]。

利用同一地区多台风力发电机的互补性来平滑出力的思路能够缓解风力波动性带来的影响。从渗透率的角度出发，需要通过智能计算技术找出一个最佳方案来评价整个系统并进行实时稳定性评估。

7.4 需求响应问题

能源管理的作用是对电气和机械系统进行控制，以减少电力需求、降低用电成本。需求响应有助于在用电高峰时减少用户的用电需求，从而确保电网的电力平衡。如果系统能够提供充分的电价、电网状态等信息，需求响应技术将发挥显著的作用。电压、功角、频率等运行参数可以反映出电网和电价的变化，通过控制器、计量信号和双向数据通信，以及实时传感器，可以实时测量这些参数。在系统稳定

性受到威胁时，自动的需求响应能够承担起维持电力平衡的任务，这个特性与智能电表、智能家电、分布式可再生能源等共同组成了智能电网的关键特征。通过实施需求响应项目，电力公司可以引导用户调整用电方式，转移部分负荷到电网低谷时段，从而辅助实现电能的高效供给，达到经济和环境的最优控制目标。

需求响应的相关技术如图 7.3 所示，其主要应用可以分为如下四类：

1）能效管理。

2）基于价格的需求响应：

a）分时电价（TOU）；

b）日前实时电价。

3）基于激励的需求响应：

a）容量市场和辅助服务；

b）需求侧竞价；

c）直接负荷控制。

4）不同时间尺度的机组组合和调度：

a）年度系统规划；

b）月度运行规划；

c）日前经济调度；

d）日内经济调度；

e）分钟级调度。

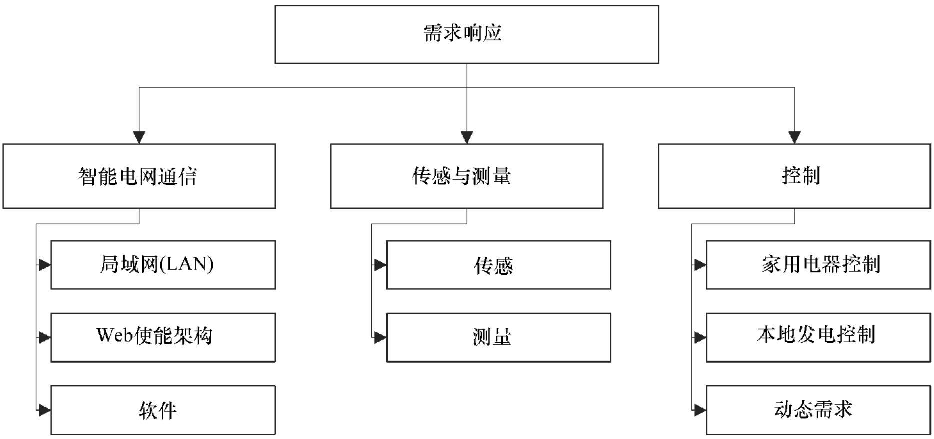


图 7.3　需求响应技术分类树

7.5　电动汽车与插电式混合动力电动汽车

将电动汽车和插电式混合动力电动汽车（PHEV）接入电网是智能电网技术的

另一个组成部分。电动汽车入网技术（Vehicle-to-Grid，V2G）可以将各式电力驱动型汽车（如使用化学电池、燃料电池或混合动力驱动）的能量在受控状态下实现与电网的双向互动与交换。一方面，电动汽车的剩余电能可以回馈到特定的电力市场中；另一方面，大量的电动汽车可以作为移动的储能装置，吸纳可再生能源发电、平滑大规模风电的出力。通过将电动汽车技术和入网技术进行合理的结合，可以克服电动汽车技术现有的一些局限性，如费用问题、电池的尺寸和重量以及较短的行驶里程等。大量 PHEV 的使用，改变了单纯使用石油的单一能源消费形式，代之以多种能源的混合使用（这一点与电力系统中典型的能源消费形式类似），同时，还可以显著减少空气污染、降低总体排放[9]。

与其他方案相比，PHEV 既有优点也有缺点。从提高电能消费、用可替代能源部分代替石油这些角度，PHEV 的大量部署将潜在地给未来电网带来重要的、正面的影响。

7.6 插电式混合动力电动汽车技术

利用 V2G 技术，停驶的纯电动汽车、燃料电池电动汽车甚至 PHEV 都可以向电网提供电能。在夜间或非峰时段可以利用电动车储存电能，在紧急情况下，如石油供应急剧下降或者油价突然上涨，剩余的电能可以短时支持汽车的行驶。值得一提的是，电动汽车电力驱动系统的效率大概是 70%，比如，第一代 PHEV 每度电的行驶里程为 3 ~4mile（1mile =1609.344m），若换算为汽油消耗，则大约为每加仑 75 美分。

每辆 PHEV 都需配备一个电力插口以及一个控制或逻辑接口，前者用于和电网进行双向功率交换，后者用于和电网进行双向信息交换。除此之外，还需配备车载控制和计量系统。图 7.4 给出了电动汽车和电网的连接示意图。由图可见，全网的电力流（图中用双箭头表示）从发电机流向终端用户，多余的电能流回到分布在全网的电动汽车中。不同类型的电动汽车可以发挥不同的作用，其中，使用电池的纯电动汽车根据不同的负荷水平，既可以充电（充当负荷角色）也可以放电（充当电源角色）；燃料电池电动汽车可以利用车载的液态或气态燃料发电；PHEV 则兼具上述两种能力。

PHEV 对电网的影响

预计 2015 年美国新增车辆中，PHEV 的市场份额将达到 10%，到 2025 年这一比例可增至 50%[8]。这些数字引起了电力公司的重视，原因在于，未来大量涌现的 PHEV 在充电时将成为电网的额外负荷并会加剧电力供应的紧张状况。例如，到 2040 年，新增 PHEV 的充电容量将导致全美负荷在现有水平上提高 18%[8]。这些新增负荷将会导致某些地区的电压跌落至额定电压的 96%，为改善电压水平，需

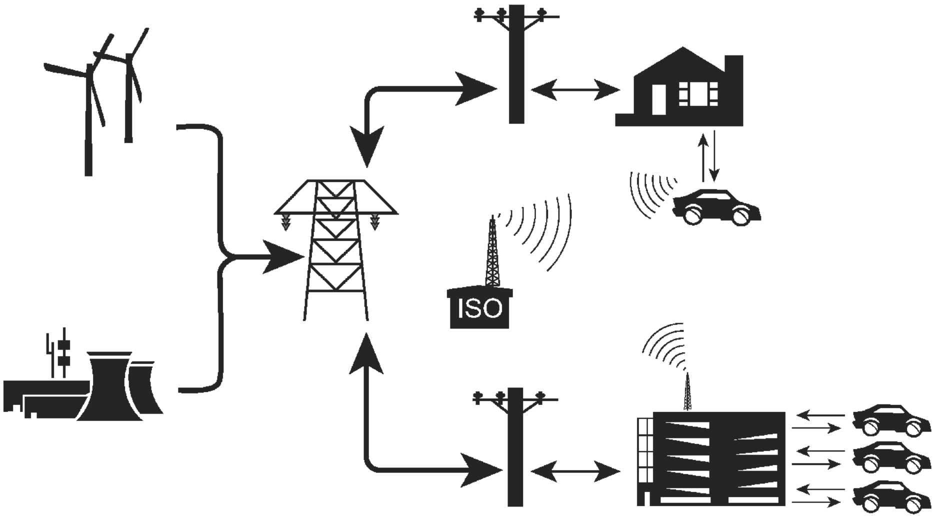


图 7.4　电动汽车与电网之间的电力线连接和无线控制连接示意图

在电网中安装新的变压器、电容器以及其他配电设备。

分析 PHEV 的每日耗电量以及日均耗电量十分必要，这样就可以评估大量 PHEV 对电网、电力市场、环境、经济方面的影响。为了评估大量 PHEV 对电网、电力市场、环境、经济方面的影响，一项关键的研究工作是分析 PHEV 每天的电力消费趋势以及一段时间的平均电力消费。目前的车辆行驶高峰分别在早晨和晚上，其中，早高峰主要是上班车流，而晚高峰则是归家后的晚餐、聚会等车流。未来 PHEV 的车流高峰特征应与目前类似。在高峰时段可能涌现大量的集中充电从而导致负荷急剧上升。为此，需要引导用户进行有序充电以维持全网的稳定性。

7.7　环境影响

减轻对环境的影响是智能电网发展的一个主要驱动力，促进可再生能源发电和 PHEV 的使用是智能电网减轻对环境影响的两个重要方面。此外，能效的提高、需求响应和负荷管理的实施都将促使清洁电力市场获得稳定发展。

7.7.1　气候变化

气候变化与温室气体排放增加所导致的全球变暖和变冷问题密切相关。气候变化指经测量发现的持续时间较长的明显的气候改变，即持续数十年或更长时间的温度、降雨、降雪、风力的较大改变。气候变化可能的原因有：

1）自然因素，如太阳辐射能量的改变或地球绕日轨道的缓慢变化。

2）气候系统内部的自然过程，例如，海水循环的改变。

3）改变大气组成（如燃烧化石燃料）和地表（如砍伐森林、植树和城市及郊区的扩大）的人类活动。

全球变暖（Global Warning）是地表附近和大气层最底层平均温度的升高。大气层温度的升高会加剧全球气候的变化。全球变暖只是气候变化的部分表现，随之而变的还有降雨量改变、海平面变化等。

全球变化（Global Change）是指代全球环境变化的一个宽泛术语，它包括气候变化、臭氧层破坏和土地使用的变化。

7.7.2 气候变化的影响

气候变化的主要影响包括：

1）能源：温度升高导致消费者更多的使用空调，从而增加能源消耗。

2）健康：极端温度如过度和长时间暴露在高温下会引起疾病。

3）农业和野生生物：不规律的天气变化意味着水的缺乏，温度升高可能导致粮食减产，最终使食品价格升高。

4）水资源：不规律的温度和天气增加了洪旱灾的可能性，并影响全球供应水的质量。由于供水受到影响，农民们不得不引水灌溉庄稼。

针对美国气候变化技术项目，美国能源部的策略包括：

1）促进分布式发电，尤其是可再生能源技术的发展。

2）储能技术的发展。

3）提高需求响应能力以削减需求峰值。

通过加强教育、鼓励参与，可以提高消费者对环境问题的敏感度。另外，已有研究，肯定了可再生能源对气候变化的积极的潜在的影响，预计会增加可再生能源的利用，从目前的13%增加到30%，与此同时，电网也会得到如下改善：

1）需求响应系统中从5%增加到15%。

2）用户端发电从1%增加到10%。

3）资产利用率从47%增加到90%。

4）输电资产利用率从50%增加到80%。

5）配电资产利用率从30%增加到80%。

7.8 储能技术

能量的存储对于电力公司负荷调节、电动汽车、太阳能发电系统、不间断电源、偏远地区的供能系统等都有重要意义。在对太阳能进行利用时，无论是太阳能加热还是光伏发电，都需要储能技术。当孤立运行的电力系统中存在波动性能源时，储能就更为重要。图7.5以微电网为例，展示了储能技术的应用。

随着可再生能源项目的大量增加，储能的重要性也日益提高，主要有两个方面

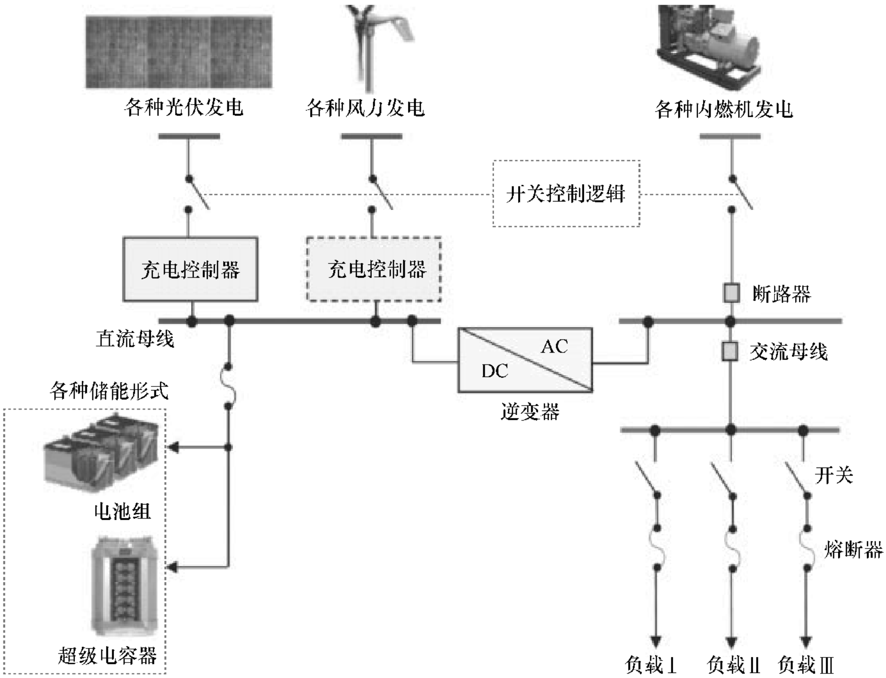


图 7.5　含储能技术的微电网系统拓扑

的原因：

1）大量重要的可再生能源都具有间歇性，其出力取决于天气状况，而非电力需求；

2）很多交通系统都要求能量能随车辆移动。

应根据具体应用的特点选择不同的储能技术，例如，要求固定储能还是移动式储能、储能的运行时间和充电间隔、所需的最大能量等。具体地，可参照如下参数选择合适的储能技术：

1）单元规模：每种储能技术都只适应于一定的应用规模，例如，并网型可再生能源就需要大规模储能。

2）储能容量：充电后总可用能量。

3）可用容量：根据荷电状态（SOC）和放电深度（DOD）计算出来的平均能量输出。

4）自放电时间：在电池充满电后开路搁置，达到一定的放电深度所需的时间。自放电时间往往还取决于系统的运行状况。

5）效率：储能装置的能量输出与输入之比。在设计可再生能源的储能类型和

能量变换系统时应考虑这个因素。

6）寿命或循环充放电次数：储能系统在维持其设备正常运行、保证技术参数处于限定范围的情况下，所能经受的连续充放电次数。应根据储能装置具体的应用场合选择合适的放电深度值，并据此制定充放电次数指标。

7）自治性（Autonomy）：储能容量和最大可放电容量之比。本参数可表征系统最长的持续放电时间。

8）能量密度：储能单元单位质量或单位容积所能储存的能量。

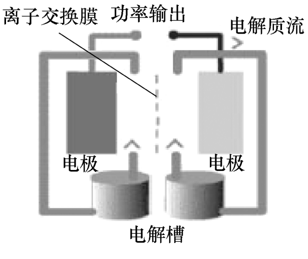
9）成本：储能的安装、运行、维护成本。应在全寿命周期内进行成本分析。

10）灵活性：对各种储能应用场景的适应性。

11）可靠性：保障服务的能力。

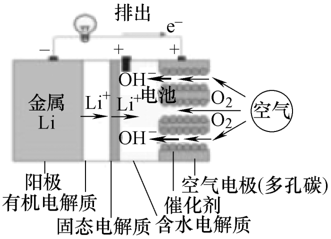
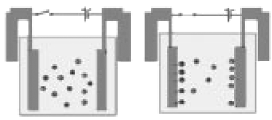
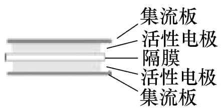
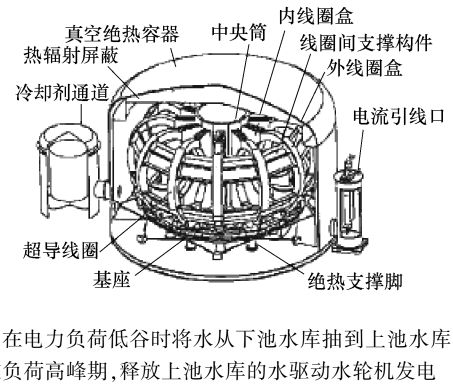
除此之外，应用中还经常考虑这样一些技术特征：所需的监控设备、运行约束、环境影响、维护的便利性、设计的简便性、运行的灵活性以及放电的响应时间等。表 7.2 比较了各种储能技术。

表 7.2　各种储能技术的比较

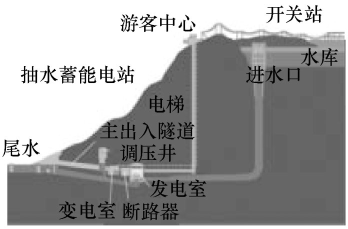
储能技术	特点/技术细节	优点	缺点
液流电池	与铅酸电池类似,但其电解液存储在外部容器中并循环流经电池堆 	·只要电解液储罐足够大,其储能容量理论上无上限	·循环寿命有限,在运行 3~5 年后即需更换
先进电池	包括锂离子电池、聚合物锂离子电池、镍氢电池⊖和钠硫电池。	·比铅酸电池体积小	·用于大规模储能时费用过于昂贵

⊖ 原文为 nickel metal hybrid,应为 nickel metal hydride。——译者注

（续）

储能技术	特点/技术细节	优点	缺点
			
超级电容器	是一种能够提供超大电流和能量的电子设备，它具有电容器和电化学电池的特点，但没有化学反应  	· 理论上具有无限次的循环寿命 · 低内阻 · 快速充电 · 充电方法简单	· 具有线性放电电压，使其容量得不到充分利用 · 能量密度较低 · 单体电容器耐压低 · 自放电较高
超导磁储能	将超导磁体线圈进行低温冷却，将直流电能量转换为磁场能并存储起来 	· 响应速度非常快 · 能在很短时间达到很高出力 · 无能量损耗 · 无旋转部件	· 容量较小，寿命较短 · 低温冷却系统技术难度大
抽水蓄能	在电力负荷低谷时将水从下池水库抽到上池水库；在负荷高峰期，释放上池水库的水驱动水轮机发电	· 开停机快速、灵敏，具有良好的调峰能力 · 低成本电力；作为备用容量，可起到调频作用	· 规划审批与环境评估需要耗费数年 · 只适应于特定的地理条件，如山区

（续）

<table>
<tr><th>储能技术</th><th>特点/技术细节</th><th>优点</th><th>缺点</th></tr>
<tr><td></td><td>
</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>压缩空气</td><td>压缩空气储能（Compressed Air Energy Storage，CAES）的原理是利用电网负荷低谷时段的剩余电力压缩空气，并将其存储在地下的密封洞穴中；在用电高峰时，将压缩空气释放出来驱动燃气轮机发电</td><td>·利用低成本高温压缩空气驱动燃气轮机发电，可以减少天然气消耗
·调节峰谷差</td><td>·燃气轮机在每次起动时都要进行暖机，为此需额外消耗能量从而导致效率降低
·能量转换效率大致只有50%</td></tr>
<tr><td>飞轮</td><td>利用高速旋转的飞轮存储动能


飞轮储能</td><td>·充放电迅速
·几乎不受温度变化的影响
·占用空间小
·循环寿命长
·无机械磨损
·维护费用低于电池</td><td>电能损失快于电池</td></tr>
</table>

7.9 税收抵免

税收抵免是一项激励方案，旨在推动用户消费并积极参与可再生能源利用，以此提高能源效率。美国能源部向消费者提供了一系列的税收抵免政策。其中包括：

1）提高家庭能源效率的税收抵免：消费者在居住的房屋中购买并安装诸如节能窗户、绝热层、房门、屋顶以及加热和冷却装置等专门的设备，就能获得该类商品售价30%的退税，最高可达1500美元。

2）住宅可再生能源的税收抵免：消费者安装太阳能系统（包括太阳能热水器和太阳能发电系统）、小型风力发电系统、地源热泵、民用燃料电池和微型燃气轮机系统，就能获得30%的税收抵免。

3）混合动力和替代燃料动力汽车的税收抵免：无论是个人还是商业团体，只要购买或者租赁了新型的混合动力轿车或者货车就有资格享受税收抵免。和同等重

量的普通汽车相比，混合动力汽车消耗更少的汽油，因此它达到了可以享受税收抵免的排放标准。此外，替代燃料动力汽车、采用先进稀燃技术的柴油车和燃料电池汽车也都有享受税收抵免的资格。

4）插电式电动汽车的税收抵免：抵免额度从 2500 美元起，上限为 7500 美元，具体金额取决于电池容量。

5）插电式混合动力改装汽车的税收抵免：抵免额度为将普通汽车改装成符合要求的插电式电动汽车费用的 10%，最多不超过 4000 美元。

6）低速车和二轮三轮车的税收抵免：联邦复苏法案特地制定了一条针对某些低速电动汽车和二轮三轮车的税收抵免。抵免额度为该类车辆价格的 10%，最多不超过 2500 美元。

7.10　小结

第 7 章主要叙述了电力系统对清洁环保技术利用的发展过程。除介绍可再生能源的使用情况外，本章还说明了电力系统对能量转换和存储技术的需求，这两项技术还有待进一步研究，以确定最优配置和实施所需的参数。新技术还包括 PHEV，它既推动了先进交通技术发展又为智能电网提供了新的储能方式。

参 考 文 献

[1] J. Twidell and A.D. Weir. *Renewable Energy Resources*. USA: Taylor & Francis, 2006.

[2] R. Wiser and G. Barbose. “Renewables Portfolio Standards in the United States: A Status Report with Data Through 2007,” *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 2008.

[3] Thermal Energy System Specialists (TESS). The Transient Energy System Simulation Tool (TR-NSYS).

[4] National Renewable Energy Laboratory 2010, Renewable Resource Data Center: PVWatts.

[5] J.I. Rosell and M. Ibanez. “Modeling Power Output in Photovoltaic Modules for Outdoor Operating Conditions,” *Science Direct: Energy Conversion and Management* 2005, 472, 424–430.

[6] M. Kaltschmitt, W. Streicher, and A. Wiese, Eds., *Renewable Energy Technology, Economics and Environment*. New York: Springer, 2007.

[7] G. Boyle, “Renewable Electricity and the Grid: The Challenge of Variability,” Earthscan, USA, 2007.

[8] C. Roe, J. Meisel, A.P. Meliopoulos, F. Evangelos, and T. Overbye. “Power System Level Impacts of PHEVs,” *42nd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2009, 1–10.

[9] W. Kempton and J. Tomic. "Vehicle to Grid Power Fundamentals: Calculating Capacity and Net Revenue," *Journal of Power Sources* 2005, 1–12.

推荐阅读

National Renewable Energy Laboratory 2010, *HOMER: The Optimization Model for Distributed Power*.

第 8 章　互操作、标准与信息安全

8.1　引言

部署智能电网元件并实现互操作需要切实全面地更新现有的标准和协议。众所周知，目前电网的信息安全和物理安全都非常脆弱，因此提高它们的安全性对于构建一个新的体系框架而言非常重要。当前的电能分配和监视仍然处于智能电网的初始阶段，变电站网络由微波、电力线载波或点对点光缆连接构成。虽然这些核心骨干通信网是电网中最基本的基础设施，但是这并不意味着它们能够为电力公司服务范围内的每个家庭、建筑或电器提供安全的双向数字通信。事实上，把上百万个这种通信连接部署到配电网中并不是一项轻松的任务。电力公司尚未确定是否已经为未来做好了准备。

如果智能电网能够实现它的所有潜力，那么客户、电力公司、国家甚至环境都会受益。不幸的是，新的技术更多地关注于智能电网的试点，很少考虑信息安全。更糟糕的是，一些专家似乎认为只需对现有通信手段加以调整即可满足智能电网对IT 网络和工业控制系统的安全性要求。因此，下面的讨论中简要概述了规划设计者面临的挑战，以及为了实现可靠和安全的操作，政策制定者应扮演的角色。

8.2　互操作性

互操作性是指“两个或多个系统或元件之间交换信息并且利用所交换信息的能力。”问题既包括在某个标准体系内的系统、元件之间的互操作，也包括跨标准的互操作。但需注意的是，遵循智能电网标准是确保互操作性的必要而非充分条件。例如，在国际电工委员会（IEC）所制定的标准中，不同的对象和属性在标准实现中可以是强制的、可选的或条件可选的。所以，必须充分理解标准中涉及的通信、管理、安全以及实际应用中所采用的运行报文等问题，才能达到互操作性。在标准开发实践中应采取如下谨慎的措施：

1）对标准化机构的活动进行审查和评估：目的是确保能够识别智能电网中各类用户的行为；

2）在设备部署之前对其进行审查：目的是确保其对功能需求的兼容性；

3）开发项目[⊖]的内部标准：目的是对标准中的问题进行持续跟踪，并对标准化机构自身做不断的评估。

8.2.1 互操作性发展现状

互操作性是发展智能计量的基本前提，而智能计量可推动竞争性电能零售市场[1]。互操作性包括技术和商业两个方面。技术互操作性主要包括燃气和电能计量的接口功能，提供智能计量服务需求，包括智能计量服务的数据格式和内容。技术互操作性依赖于智能计量所使用的市场模型。需要研究广域网（WAN）和局域网（LAN）的通信接口。与用户利益密切相关的客户合约要通过成本效益分析来确定。在进行案例分析时要有前瞻性，以确保在各种解决方案中不要遗漏诸如需求侧管理、智能电网等要素。

8.2.2 互操作性的益处与挑战

互操作性允许网络能够无缝地、自主地集成所有电力供应设备，尤其是监视与测量装置、配电与变电装置、管理和通信装置。在这个过程中使人为干预最小化是其最大好处。

挑战则包括需要增强现有通信网络、对现有技术进行改进和整合，以及开发和实现一套综合的标准体系。解决恶意攻击需要开发用于认证和确认的安全协议以对访问进行授权。

8.2.3 智能电网环境下的互操作模型

对于网络的互操作性能，必须考虑几个关键的特征，它们或彼此关联或相互独立[2]。下面简要介绍由电网智能化架构委员会（GridWise Architecture Council，GWAC）开发的智能电网概念模型。该模型有一个 8 层协议栈（称为 GWAC 协议栈），提供了确定智能电网互操作需求和定义信息交互内容的上下文环境[1]。这些协议层给出了智能电网中各种交互的时序过程，每一层都依赖于其下一层，因此只有每一层皆正常工作，整个协议栈才有效[2]。随着网络需要越来越复杂的功能，为了实现互操作可能会需要更多的层。GWAC 认为，上述层次可按类别或驱动力进行归类，各类有其特殊目的，例如：

1）技术类：强调信息的语法或格式，关注信息如何在通信介质上进行表达。

2）信息类：强调互操作的语义方面，关注交换哪些信息以及它们的含义。

3）运行类：强调互操作的应用方面（包括商业的和政策的），尤其是与电能管理相关的方面[3]。

8.2.4 智能电网通信网络的互操作性

计算机需要具体的数据和指令才能完成任务。难点在于设计语言和协议以确保

⊖ 此处的“项目”指标准化机构（如 IEC）制定新标准的项目。——译者注。

计算机之间有效的通信，这些计算机可能使用同一种协议，也可能使用不同的协议。主要问题是促进设备之间高效、快速的数据交换。互操作性并不局限于网络的物理方面，设计师必须同时考虑当两个设备交互数据时，它们必须“说相同的网络语言”，并且在数据到达目标设备后能被正确地解释。

解决这个问题需要建立网络标准，这样互连计算机之间才能够流畅地通信。不幸的是，这并不是一个简单的任务。例如，为了满足某些特定的系统需求，一些计算机可能使用特殊的或私有的协议与其他计算机通信。在这种情况下，数据传输和通信就非常低效甚至无法完成。

8.2.5 互操作性和电网的控制

正如前面章节所述，网络化控制对电力公司来说是个重要问题。为了升级到智能系统，网络应该配备智能设备，它们能够监测到问题、向电力公司汇报、接受控制或恢复指令并执行操作。完整的控制要求所有机器都能够通信、解释和执行任务，但今天的大多数机器都不具备这些功能。

为了应对不断变化的市场环境，SCADA 和 EMS 需要控制中心与其他控制中心、管理机构、电力市场、独立发电商、大用户和大供应商之间保持通信[6]，这使得 SCADA 和 EMS 变得很低效。控制中心必须连接到各种智能设备，并保持系统的高效、无中断的运行。这迫使用户最终应在电力消费方面具有相当程度的自治能力，以对电力中断做出更为快速和高效的响应。

8.3 标准

标准规范了某个产品对于某特定用途的适应度，或者定义了某个设备或系统的功能和性能[1]。许多标准化机构正着手解决行业之间的互操作问题，其中包括电力行业。这些标准化机构包括美国国家标准技术研究院（National Institute of Standards and Technology，NIST）、国际电工委员会（International Electrotechnical Commission，IEC）、美国电气电子工程师学会（Institute for Electrical and Electronics Engineers，IEEE）、互联网工程任务组（Internet Engineering Task Force，IETF）、美国国家标准学会（American National Standards Institute，ANSI）、北美电力可靠性协会（North American Electric Reliability Corporation，NERC）以及万维网联盟（World Wide Web Consortium，W3C）等。表 8.1 列出了一些重要标准化机构正在开发的标准。

由于标准开发的急切需要，NIST 启动了一个计划来促进标准的建立，该计划“建立了对标准进行长期改进的宏观框架以及相应的测试和验证的步骤。”作为该计划的第一步，NIST 于 2009 年 9 月发布了《NIST 智能电网互操作标准框架和路线

图 1.0》[8]。在这份文档中包含了近 80 个现有的标准。

表 8.1 重要标准化机构开发的智能电网相关标准摘要[4]

标准化机构	机构介绍	应用于智能电网的重要标准
IEC	全球领先的标准化组织,发布电气和电子行业的相关技术标准;在电力工业的通信领域已经开发了一些实用标准	IEC61850:变电站自动化、分布式发电(光伏发电、风电、燃料电池等)、SCADA 通信、配网自动化。目前正试图将该标准应用于插电式混合动力电动汽车(PHEV)的接入 IEC61968:配电网管理,高级量测体系(AMI)与后台系统的接口 IEC TC 13、57 工作组:电能计量中的通信,尤其是 AMI 的通信
IEEE	所开发的标准涉及电气和电子行业所有领域,已开发了大量通信和互操作方面的标准	IEEE 802.3:以太网 IEEE 802.11:无线局域网(Wi-Fi) IEEE 802.15.1:蓝牙 IEEE 802.15.4:Zigbee IEEE 802.16:全球微波互联接入(Worldwide Interoperability for Microwave Access,WiMAX)
IETF	负责互联网标准开发,发布标准的 RFC 文档	RFC 791:互联网协议(IP) RFC 793:传输控制协议(TCP) RFC 1945:超文本传输协议(HTTP) RFC 2571:简单网络管理协议(SNMP) RFC 3820:X.509,公钥基础设施(PKI)安全
ANSI	为 AMI 系统的互操作开发相关标准	ANSI C12.19:计量设备数据表 ANSI C12.22:计量设备数据表的通信
NIST	发布互操作相关的安全指南	NIST SP-800.53:联邦信息系统安全控制的建议 NIST SP-800.82:工业控制系统安全指南
NERC	大电网安全标准,可能扩展到配电网和 AMI 系统	NERC CIP 002-009:大电网安全标准,包括关键网络资产标识、安全管理控制、人员培训、电子安全边界、关键网络资产的物理安全、系统安全管理、事故报告和响应预案、关键网络资产的恢复方案
W3C	万维网互操作技术,包括规范、指南、软件和工具	HTML:网页设计 XML:结构化文档和其他对象模型 SOAP:用于应用之间数据通信的 Web 服务

智能电网互操作标准的实施路线

NIST 所建立的智能电网互操作路线图包括:

1) 需求响应和用户能源效率;
2) 广域态势感知;
3) 电能存储;
4) 电动交通;
5) 高级计量管理;
6) 配电网管理;
7) 信息安全;
8) 网络通信。

这些标准分别适用于输配电系统以及电力设备。表 8.2 列出了这些标准。

另外，有几个标准是关于不同电网等级的通信、需求响应和量测设备。例如，在电能质量领域，IEEE 和其他一些管理机构有它们自己的一套标准。

表 8.2　不同等级电网的标准

电网等级	标准	描述	应用
输电与配电	电力系统同步相量标准(IEEE C37.118-2005)	该标准定义了电力系统中应用的同步相量测量。它定义了同步相量的测量精度、测量精度与标称是否一致的测试方法以及容许的测试误差范围。它同时还定义了数据通信协议,包括在实时系统中传输这些数据的报文格式	同步相量测量装置及其通信
输电与配电	分布式电源与电力系统互连标准(IEEE 1547-2003)	列出了分布式电源接入电网的标准和要求	分布式电源与电网之间的物理和电气连接
输电与配电	电力系统通用信息模型(CIM)(IEC 61968/61970)	描述了电力系统元件和电力系统软件的数据交换,如资产追踪、工作计划、用户账单等,以及电力系统元件之间的关系	能量管理系统的应用级接口
配电㊀	变电站内通信网络和系统(IEC 61850)	设计变电站的标准,解决互操作、系统集成、设备和数据建模、命名以及快速通信等问题。标准为服务、数据和通用数据类提供了抽象定义,使其独立于底层的具体协议	遥控、远程计量、变电站自动化
配电、终端用户	高级量测体系(AMI)的系统安全需求 AMI-SEC(2009 年 6 月)	为电力公司和制造商提供了一套 AMI 的安全需求,可用于产品采购环节。这些安全需求是从被多个行业广泛接受的安全标准和最佳实践中收集来的需求超集	AMI 以及智能电网端到端的安全性
配电、终端用户	公用设施工业终端设备数据表(ANSI C12.19-2008)	定义了公用事业公司的应用数据表格结构,该数据在用户终端设备和计算机之间传输。它没有定义终端设备的设计标准,也没有规定数据传输的语言或协议。定义这些数据表的目的是描述终端设备输入输出数据的结构	计量的信息模型

8.4　智能电网信息安全

为了提高电网的可靠性、安全性和效率，智能电网在计量、电网运行与状态监

㊀ IEC 61850 主要针对变电站，故此处应为“变电”。——译者注

视、配网自动化等环节中越来越广泛地使用数字信息、控制技术以及智能技术（Smart Technologies，如用于优化家用电器和用户设备运行的实时、自动和交互式技术）。这样，信息安全问题就越来越受到关注。电力网、通信网和信息网的相互交融对促进基础设施的健壮性和可持续性是非常重要的，它能够进一步提高电能供应的充裕度，支持国家的经济和社会发展。在进行脆弱性评估、事故识别、故障记录、报告和事故恢复的同时，还需要开发相关技术和协议以维护系统、网络、数据和 SCADA 的安全。另外，网络数据的保护也是很重要的。

8.4.1　信息安全发展现状

信息安全是智能电网发展的重要前提。但是，智能电网的信息安全要求是不断变化的。信息安全包括确保信息通信系统的保密性、完整性和可用性的各种措施。这些信息通信系统对管理和保护智能电网的电能传输、信息技术和通信基础设施都非常重要。

基础设施包括信息和通信系统及相关服务以及包含在这些系统和服务中的信息数据。信息和通信系统及相关服务是由处理、存储和传输信息的硬件和软件构成。处理过程涉及各种介质类型，如纸质、磁性介质、电子介质等。

信息安全是指抵御来自计算机终端的威胁以及保护物理资产免于被修改或破坏，无意或有意地误用基于计算机的控制设备会导致这种破坏[7]。智能电网安全协议包括威慑、阻止、检测、响应和控制等。一个成熟的智能电网应该能够阻止一段时间内持续的多方、联合攻击。提高信息安全性会降低异常事件对电网稳定性和完整性的影响，保障社会和经济的安全。

信息安全协调任务组的目标是在体系结构级别设计智能电网的安全。它的任务包括整理各种需要考虑信息安全的案例、进行风险评估（如脆弱性、威胁和影响）以及研发安全体系结构[2]。

本质上，信息安全应该是内置的，而不是附加的。这些策略包括：

1）基于智能电网用例（参见 NIST 路线图）评估系统的功能和数据流，尤其要注意它们的相似性和不同点；

2）识别相关的威胁，以及系统数据流的保密性、完整性、可用性或审计性被破坏后的影响和后果。

信息安全需要各种各样的解决方案，并不仅仅局限于加密和口令保护。它可能包括：

1）现有系统的安全评估和安全加固；

2）脆弱性评估；

3）灾难恢复；

4）入侵检测和事故响应；

5）事件记录、归类和关联。

信息安全问题的另外一种理解是认为安全破坏的发生是不可避免的，因此需要开发应急和恢复方案。

表 8.3 列出了电力系统可能面对的安全威胁，包括老系统和新系统。

表 8.3　电力系统面对的安全威胁

	老系统面对的传统威胁	新系统面对的安全威胁
影响	对物理设施的直接破坏	通过破坏软件系统间接破坏物理资产
安全威胁发起的位置	本地	本地或远程
目标	个体	个体、竞争者或组织
攻击点	单个地点	多点同时被攻击
破坏的持续时间	导致显而易见的直接破坏	攻击可能未被发现或处于潜伏状态中，后期才被触发
发生频率	单次攻击	与攻击相关的持续破坏
恢复	攻击后恢复	攻击可能会产生持续的影响，从而阻碍恢复

智能电网信息安全的研发目标，关键是要保证设备和系统的数据和通道的保密性、完整性以及可用性，并提供安全记录、监视、告警和通知。数据保护包括传输和存储中的数据的保密性，可采用加密和认证的方法提高攻击难度。综合运用检测、校正和预防控制可降低信息安全风险。一旦风险确定，最好的方法需要平衡性能、成本以及有效性。

所有已知的网络威胁可由某种检测控制手段进行监视。相关技术包括基于主机的入侵检测系统（Host-based Intrusion Detection System，HIDS），可监视对服务器和应用系统的非授权变更；基于网络的入侵检测系统（Network - based Intrusion Detection System，NIDS），可发现基于网络的攻击；平台相关的控制，如病毒检测和恶意代码检测。这些检测手段为设计和测试人员提供了系统面对真实攻击和威胁时的关键数据。利用这些检测手段，可以重构攻击，识别和追踪攻击者，从而为法院提供有力证据。另外，这些检测手段所提供的数据也可以帮助选择校正和预防控制手段。

校正控制的目的是在攻击事件发生后使系统尽快恢复正常运行。这种控制手段可以是手动的，也可以是自动的。手动的手段包括切换到备用系统的标准化步骤等。自动的手段包括故障切换设计，它能够自动地退出被破坏的系统，并用正常的系统代替。校正控制一般试图隔离和保存已实施的攻击，以便进行法庭分析，并在设计、建设和部署阶段实现彻底的校正。

实现安全的方法试图解决整个生命周期和整个工程过程中的各种风险，但预防控制对防御实现阶段的风险非常有效。例如，拒绝服务攻击只能通过安全工程和预防控制手段来防范。其他一些攻击手段只能使用预防控制手段（如网络规则或基于角色的访问控制）来部分防范，直到系统进行了更复杂的变更、测试并重新部署。GridPoint 就采用预防控制手段来降低安全风险，遵循安全管理规定和最佳实

践指南，包括网络层的过滤和规则，系统级防护机制和硬件级防护机制。

8.4.2　信息安全风险

网络安全风险在项目生命周期的每个阶段都会出现，包括管理、运行和技术方面的风险。这些风险可能会影响装置和系统，网络管理和集成，通信、控制、运行和系统可用性。容易被攻击的主要部分包括 IT 应用系统、通信网络和终端（如计量终端、家用显示器和恒温器等）。由于通过可公开访问的装置进行信息交换，因此确实存在影响数据和控制指令完整性的风险。例如，智能计量终端采用无线通信技术，而无线信号可能会被窃听或改变。

为了满足安全需求，很多系统约束需要考虑。这些安全需求并没有说明在一个给定环境中应该采用哪种方案最为合适，如采用窄带通信还是宽带通信。这种决策需要谨慎地在一系列矛盾要求中取得平衡。在考虑网络安全风险时，下列因素也必须同时考虑：

1）其他商业需求或非功能性需求；
2）性能（如响应时间）；
3）易用性（如人机交互的复杂性）；
4）可升级性（如更新或替换某些模块的难易程度）；
5）适应性（如在其他系统中应用时重新配置的难易程度）；
6）有效性（如采用及时、准确、一致且方便的方式传递与商业过程相关的信息）；
7）高效性（如通过最富有成效的和经济的方式利用资源以提供信息）；
8）保密性（如保护敏感信息，避免非授权泄露）；
9）完整性（如与商业价值和预期相一致的信息的准确性、完整性和有效性）；
10）可用性（如信息在需要的时候必然存在）；
11）一致性（如与法律、规定和合约一致）；
12）可靠性（如提供适当的管理信息，让相关实体执行信托和管理职责）。

当研发和应用安全需求时，考虑系统的约束是非常重要的，一般包括：

1）强制规定；
2）计算约束（如远程设备中的可用计算能力）；
3）网络约束（如带宽、吞吐量或反应时间）；
4）存储约束（如固件或审计日志所需要的存储容量）；
5）电源约束（如远程设备中可用的电源）；
6）人力约束（如对平均维护时间的影响）；
7）经济约束（如大型设备的成本）；
8）时间约束（如对案例时效进行定级）；
9）技术约束；

10）可用性；

11）成熟度；

12）互操作性（如与老系统的交互）；

13）生命周期；

14）与基础设施的互联；

15）应用（如自动化系统和处理这些信息的手动步骤）；

16）信息（如商业系统中使用的任何形式的数据，包括信息系统的输入、输出和处理中的数据）；

17）基础设施（如技术和设备，包括硬件、操作系统、数据库管理系统、网络、多媒体以及容纳这些设施的环境，它们提供对上层应用的支持）；

18）人员（如规划、组织、获取、实现、发布、支撑、监视和评估信息系统和服务的相关人员。它们可能是内部、外部或临时签约的人员）。应考虑时间、成本、技术、操作、文化、种族、环境、法律、管理要求、影响范围以及使用方便性等因素。

8.4.3　高级量测体系中的信息安全考虑

高级量测体系（AMI）是电网、通信基础设施和信息基础设施的综合体[5]。它是系统的系统，由众多的软件、硬件、操作人员、信息构成，包括账单管理、客户支持和服务、电能分配等应用。每个应用都有相关的网络安全问题，如表8.4所示。

表8.4　AMI系统相关的网络安全问题

应用	网络安全问题
市场应用：账单管理	保密性：用户数据、信号和位置信息的私密性 完整性：计量数据；位置信号和干预指示信号 可用性：远程读取的计量数据，连接或断开服务
客户服务	保密性：通过控制命令、价格信号和消息实现对用户设备的访问控制；用户数据和支付信息的私密性 完整性：控制报文传递和报文信息，包含预付费、使用情况以及价格等信息的数据；远程读取的计量数据；位置信号和干预指示信号 可用性：远程读取的计量数据，连接或断开服务，使用情况数据，价格信息等；用户支付数据和使用余额
电能分配	保密性：用户设备的访问控制，包括远程服务切换和HAN设备 完整性：控制报文传递和报文信息；系统数据 可用性：客户设备；系统数据

参考文献［5］中探讨了构建AMI系统的安全域的问题。安全域模型可用于限制实现一个鲁棒的、安全的AMI系统所需要的安全要求的复杂度，可用于指导电力公司把安全需求应用于AMI系统的实现。表8.5中的6个服务就是对安全域的

描述。每个电力公司所实现的 AMI 会因为选择的具体技术、电力公司的相关政策以及部署环境的区别而有所不同。

表 8.5　AMI 安全与描述

安全域	描　述
电力公司边界服务 (Utility Edge Services)	包括电力公司所管理的与监视、测量、控制相关的所有现场服务
用户端边界服务 (Premise Edge Services)	包括用户所管理的与监视、测量、控制相关的所有现场服务
通信服务	包括中继、路由、现场接入、现场通信集成、现场通信管理等应用
管理服务	自动化和通信服务的人工支持服务，包括设备管理
自动化服务	无需人干预的数据收集和传输，完成必要的翻译、转换、响应和数据分段
商业服务	核心商业应用，包括资产管理

8.4.4　降低信息安全风险的途径

控制错误或安全威胁的步骤包括：

1）对需要保护的信息进行甄别和分类；

2）详细定义安全需求；

3）评估所提出的安全架构是否满足安全需求；

4）采购的系统在设计上应满足具体的安全需求，并且随着安全标准的完善，具有不断升级的能力；

5）在测试和安装阶段要对安全控制手段进行测试；

6）在部署系统之前要对安全态势进行独立的评估；

7）对发现的脆弱性风险，应制定补救方案加以控制；

8）安装的系统应具有内置的管理、运行和安全控制模块；

9）监控并周期性地对安全控制的有效性进行评估；

10）随着安全标准和产品的成熟，应进行适当的安全升级；

11）监视通信通道；

12）对计量设备进行监视以发现故障设备或窃电行为；

13）确保定期地实现设备与网络的同步，以及时发现设备故障、窃电等潜在问题；

14）用最新的黑客技术进行渗透测试，试图攻破系统，以发现可能的脆弱点，并远程验证运行在计量终端中的软件的合法性。

8.5　信息安全以及用户可采取的防御措施

支持智能电网监控功能的每个通信路径都是双向通信。对于技艺高超的攻击者来

说，每条路径都是一个潜在的攻击路径。会有很多未受物理保护的潜在访问点。攻击者能够很容易地监视无线网络，并发动中间人攻击。现有安全机制都是用来防止对这些通信路径的非授权使用，但是这些机制中仍然存在脆弱点。历史上复杂网络的安全事件暗示我们将会有更多的脆弱点被发现。因此，实现网络安全的关键点包括：

1）对系统进行现场检查，来验证 CIP 的一致性，不要使用当前纸上谈兵的方法；

2）承认攻击者和恶意代码总会穿过或绕过当前基于外墙（outer-wall-based）的网络防御措施，在内部网络之间使用 DMZ 建立更小的防御边界。

8.6　小结

本章研究了对设计智能电网至关重要的基本工具和技术。这些工具和技术可以分为：①计算机技术；②通信、测量、监视技术。基于诸如可控性、互操作性、可靠性、可适应性、可持续性、高效性、随机性、可预测性等性能评价指标，本章明确了相关工具最合适的应用。本章也介绍了 NIST 和 IEEE 在重要标准领域正在进行的工作，包括计划采纳哪些现有标准或者根据应用需要扩展哪些标准。随着电网技术和新技术的引入，互操作问题也在凸显。在探讨开发和部署网络安全防护所面临的挑战时，充分认识到电网对通信和信息系统的依赖性正在不断增强是极为必要的。

参 考 文 献

[1] J.A. Momoh. *Electric Power System Application of Optimization*, New York: Marcel Dekker, 2001.

[2] J.L. Marinho and B. Stott. "Linear Programming for Power System Network Security Applications," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 1979, vol. PAS-98, pp. 837–848.

[3] R.C. Eberhart and J. Kennedy. "A New Optimizer Using Particle Swarm Theory," *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micromachine and Human Science*, 39–31, 1995.

[4] G. Riley and J. Giarratano. *Expert Systems: Principles and Programming*, Boston: PWS Publisher, 2003.

[5] A. Englebrecht. *Computational Intelligence: An Introduction*. John Wiley & Sons, Ltd., 2007.

[6] M. Dorigo and T. Stuzle. *Ant Colony Optimization*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2004.

[7] "Appendix B2: A Systems View of the Modern Grid-Sensing and Measurement," National Energy Technology Laboratory, 2007.

[8] Report to NIST on the Smart Grid Interoperability Standards Roadmap—Post Comment Period Version. http://www.nist.gov/smartgrid/upload/Report_to_NIST_August10_2.pdf.

推荐阅读

Z. Alaywan and J. Allen. "California Electric Restructuring: A Broad Description of the Development of the California ISO," *IEEE Transactions on Power Systems*, 1998, 13, 1445–1452.

A.G. Barto, W.B. Powell, D.C. Wunsch, and J. Si. *Handbook of Learning and Approximate Dynamic Programming*. IEEE Press Series on Computational Intelligence, 2004.

T. Bottorff. "PG&E Smart Meter: Smart Meter Program," *NARUC Summer Meeting*, 2007.

B. Brown. "AMI System Security Requirements," UCAIUG: AMI-SEC-ASAP, 2008.

M. Dorigo and T. Stutzle. "The Ant Colony Optimization Metaheuristic: Algorithms, Applications and Advances." In F. Glover and G. Kochenberger, eds.: *Handboook of Metaheuristics*. Norwell, MA, Kluwer, 2002.

B. Milosevic and M. Begovic. "Voltage-Stability Protection and Control Using a Wide-Area Network of Phasor Measurements," *IEEE Transactions on Power Systems* 2003, 18, 121–127.

J. Momoh, *Electrical Power System Applications of Optimization*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.

"NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards," Office of the National Coordinator for Smart Interoperability, Release 1.0, 2009.

A.G. Phadhke. "Synchronized Phasor Measurements in Power Systems," *IEEE Computer Applications in Power* 1993, 6, 10–15.

D. Shirmohammadi, B. Wollenberg, A. Vojdani, P. Sandrin, M. Pereira, F. Rahimi, T. Schneider, and B. Stott. "Transmission Dispatch and Congestion Management in the Emerging Energy Market Structures," *IEEE Transactions on Power Systems* 1998, 13, 1466–1474.

H. Singh and F.L. Alvarado. "Weighted Least Absolute Value State Estimation Using Interior Point Methods", *IEEE Transactions on Power Systems* 1994, 9.

P.K. Skula and K. Deb. "On Finding Multiple Pareto-optimal Solutions Using Classical and Evolutional Generating Methods," *European Journal of Operational Research* 2007, 181, 1630–1652.

"Smart Grid Communication Architecture," Pike Research, 2011.

"Smart Grid Initiatives White Paper," OSI Revision 1.1, 2009.

T.M. Smith and V. Lakshmanan. "Utilizing Google Earth as a GIS Platform for Weather Applications," *22nd International Conference on Interactive Information Processing Systems for Meteorology, Oceanography, and Hydrology*, 2006.

C.W. Taylor. "The Future in On-Line Security Assessment and Wide-Area Stability Control," *IEEE Power Engineering Society* Winter, 2000, 1, 78–83.

W.H. Zhange and T. Gao. "A Min-Max Method with Adaptive Weightings for Uniformly Spaced Pareto Optimum Points," *C4omputers and Structures* 2006, 84, 1760–1769.

L. Zhao and A. Abur. "Multiarea State Estimation Using Synchronized Phasor Measurements," *IEEE Transactions on Power Systems* 2005, 20, 2005.

D. Zhengchun, N. Zhenyong, and F. Wanliang. "Block QR Decomposition Based Power System State Estimation Algorithm," *ScienceDirect* 2005.

第 9 章　智能电网的研究、教育和培训

9.1　引言

智能电网需要具有专业知识的工程师和专家，而不是熟练的技术工人。除了智能电网发展的技术方面，工程师还需要学习制造、数据管理、资产优化、政策和协议开发等知识[1]。智能电网也需要在信息安全、控制、通信、计算机智能技术、决策支持工具等领域进一步扩展研究范围[2]。

随着技术和电力市场的发展，发电、输电和配电的运行和管理也在发生变化。技术方面的发展体现在新技术的引入，如电力电子、分布式发电、可再生能源、微网、数字式保护的协调、监控、能量管理等。市场驱动的电力营销环境也产生了对非电气工程学课题的研究需求，如运行管理和经济学。

9.2　智能电网的研究领域

在智能电网发展过程中，正在进行的研究包括面向实时应用的 FACTS 装置的协调和优化布点、面向实时电压稳定的 PMU 以及可靠性的监视和控制等。其他研究工作还包括高级配网自动化，以及能够根据实时电价机制实现用户侧需求管理等。

根据所需部署的分析工具（见表 9.1），这些研究活动可以分为：

1）仿真和分析工具：仿真电力市场和电力系统，验证远景规划。这些工具把电力运行和经济行为组合到一个模型中进行分析，研究系统中某些变化会导致的影响，以确保公平性。

2）开发由政府推动或来自工业界的智能技术：启动变革。

3）试验平台和示范工程：逐渐增大试验规模，验证新技术的价值或发现其存在的缺点；降低可能存在的风险，提高社会对变革后的新一代能源网络的接受度[3]。

4）新的制度化、机构化的市场框架：支持通过技术创新实现技术的发展和演

变；发展教育、研究和培训，以满足新技术发展要求。

表 9.1 智能电网所需部署的分析工具

问题	传统方法	对静态模型的改进	智能电网部署建议
稳定性	李雅普诺夫方法；暂态能量函数；分叉方法；特征根分析	准稳态建模	快速、准确的评价指标；实时计算；采用学习算法和自适应动态规划进行协调控制
最优潮流	内点法；信赖域法	序列二次规划（SQP）、简约空间 SQP 算法（rSQP）	自适应动态规划、启发式方法、混合方法，解决预测和随机性问题
经济调度/机组组合	满足约束的最小成本法	非线性内点法的变种	基于知识的系统；计算机智能方法；解决不确定性和随机性问题
可靠性	状态枚举；影响分析；可靠性指标	为可靠性研究提供概率输入数据	计算机智能和考虑数据动态特性的混合方法

9.3 智能电网的研究活动

技术研究的关键目标包括：

1）利用智能电表、需求响应、分布式发电和储能等先进技术降低峰值负荷，提高能效；

2）研究利用需求响应、分布式发电和储能设备提供辅助服务的方法；

3）推进广域测量体系和控制网络的应用，包括数据挖掘、可视化、高级计算以及高度分布式环境下的安全和可靠通信；

4）在调度中心环境[4,5]中模拟一组有代表性的局部或大范围停电案例，测试新的提高可靠性的技术，如利用通信网络提高可靠性的技术；

5）研究通信网络为支持高级应用所应具备的能力；

6）研究分时电价和实时电价的可行性；

7）为输电网应用软件研究先进算法；

8）挖掘未被充分利用的发电能力，在交通系统中使用电能代替液体燃料；

9）开发互联协议，使电力公司能够将电动汽车作为移动储能使用，以帮助削峰填谷。

9.4 跨学科的研究活动

除了电网自身技术方面的研究，智能电网的研究领域还将涉及多个学科，如经济、金融、政策和环境科学等。智能系统、自适应控制、新兴电力市场的定价、金

融工程学、社会经济学、对气候变化和环境影响的研究等，都属于系统工程学的范畴，这些都属于跨学科的研究内容。下面举例说明跨学科研究和教育的内容：

1）开发新技术以降低峰荷，提高能源使用效率；

2）研究利用需求响应、分布式发电和储能提供辅助服务的方法；

3）推动广域测量和控制网络的使用；

4）网络资产管理和体系结构的研究；

5）测试新的可靠性技术，包括在电网调度中心环境下模拟通信网络的可靠性；

6）研究迁移到分时电价和实时电价的可行性；

7）开发输电系统应用软件的各种新算法。

9.5　智能电网教育

为未来电力工业创建一套新的专业课程体系是极为重要的。课程体系中需要定期引入新的研究领域、分析工具以及职业发展路径等。开发一套教育方案需要电力工程专业之外的很多经验和技术。建立一个平台以方便授课也是非常必要的，例如基于 Web 的课件库、交互式/远程电力实验室。另外，还需鼓励开展国际合作以利于知识和专业技能的共享。

智能电网的基本原理包括它的定义、体系结构、性能评价方法、分析和决策支持工具的开发方法，此外还包含可再生能源等内容。设计新一代电网需要跨专业知识，如通信理论、最优化、控制、社会和经济约束以及动态优化技术等。

传统的电力工程学课程是直接面向电力工程师，涉及电能传输和远程通信基础设施的运行、通信系统的设计以及电力电子和控制系统的开发等。电力系统课程包括基本理论和相关实践工作的介绍，现有课程体系主要包括如下模块[1]：

1）电能的利用和管理。

2）应用新技术提高电能质量。

3）高电压工程；电力电子控制。

4）与电力工程学相关的其他跨学科内容。

为了推动智能电网的发展，新设计的课程体系中应该包括：

1）直接的数字化控制；

2）系统调度员的角色；

3）电力系统的动态行为和稳定性；

4）电能质量以及相关的信号分析；

5）输配电的硬件和向中间件的迁移；

6）电力系统保护的新概念；

7）环境和政策问题；

8）可靠性和风险评估；

9）经济性分析、电力市场和规划。

课程建设可以面向高年级本科生和研究生。在大学之外，课程可以面向电力系统的技术人员和政策制定者。需要对课程模块进行集成以展示智能电网的设计。新的课程应该包括如下关键内容：

1）考虑不确定性的规划和运行；

2）实时量测以及相关技术和工具的应用，如 PMU，用于稳定性、可靠性和效率分析的状态估计；

3）可再生能源以及储能技术；

4）电网性能评价和相关问题，包括可持续性、电能质量、互操作性、信息安全等；

5）自适应和随机优化等新技术的发展，利用这些新技术实现资源的优化分配和调度，如机组组合、故障恢复和网络重构等；

6）面向智能电网的电力市场和报价等辅助服务、商业案例等。

智能电网基本原理课程的大纲将会分为如下几个模块[2]。

9.5.1 模块 1：引言

1）什么是智能电网？

2）工作定义和相关概念。

3）智能电网的功能。

本模块介绍智能电网发展的历程，包括各个主要参与方的贡献以及政策的发展，当然也会包括智能电网的工作定义和特征。

9.5.2 模块 2：体系结构

智能电网的体系结构和构成。

本模块将会对所提出的体系结构进行讨论。智能电网的基本构成包括输电自动化、系统协调、态势评估、系统操作、配电自动化、可再生能源的接入、能源使用效率、分布式发电与储能、需求参与信号和选项、智能家电、PHEV 等。

9.5.3 模块 3：功能

1）智能电网功能综述。

2）智能电网各环节的功能，包括发电、输电、配电和终端用户。

本模块把智能电网的功能分为若干层次，每个层次都具有相应的技术和分析工具，并且为了提高能效和可持续发展能力在供电和用电方面都有所革新。

9.5.4 模块 4：工具和技术

1）计算技术：分析方法，如决策支持工具、静态和动态的最优化技术。

2）智能技术。

3）其他技术：通信技术；传感、计量和量测技术、可再生能源。

本模块将会介绍一些典型的分析工具和方法、新的全局优化技术和信息技术，这些技术在提高智能电网的可预测性、适应性以及基础设施的可持续发展性、健壮性等方面具有重要作用。本模块还会对分析工具的性能指标进行评价，这些指标包括可控性、互操作性、可靠性、适应性、可持续性、可预期性、安全性等。

9.5.5 模块5：设计途径

1）工具和方法的选择标准。

2）先进的优化和控制技术。

3）在发电、输电、配电和终端用户等各个环节的自动化。

本模块将会应用先进的最优化技术提高电网各个环节的自动化程度。

9.5.6 模块6：可再生能源技术

1）介绍。

2）储能技术。

3）电动汽车（EV）和PHEV。

4）环境影响和气候变化。

5）经济问题。

本模块将会介绍可再生能源技术，主要研究分布式电源、储能和电力电子技术，以及电动汽车和PHEV等。这些技术的特征、优缺点也会在本模块中讨论，相关的环境和经济问题也会被关注。

9.5.7 模块7：通信技术

1）网络拓扑介绍。

2）广域测量体系。

3）高级计量体系。

本模块将探讨开发一个开放的体系架构所需要的通信技术，这个架构能够安全地集成智能传感器、控制设备、控制中心、保护系统和终端用户。

9.5.8 模块8：标准、互操作和信息安全

本模块将包括标准的开发和实现、互操作性和面向智能电网环境的信息安全等研究。

9.5.9 模块9：案例研究和试验平台

本模块提供发电、输电和配电的案例研究，包括工业界对各种技术的实现情况以及学术界在试验平台的建设和应用等方面的情况。教学形式不限于课堂，还有基于项目的学习、案例研究以及实验等。

9.6 培训和职业发展

多年以来，电力工业一直面对这样的现实：有经验的专业人员也如电力系统本身一样在逐渐老化。智能电网的发展为尽快解决上述两个老化问题提供了很好的机会。有些培训课程对更新现有专业人员的知识和培训未来的专业人员是比较合适的，如新的数字化和分布式电力系统培训课程。经验表明，无论调度人员还是工程师都需要跨专业的知识才能很好配合[5]。在电网的各个发展阶段、各个环节，都需要对现有员工或潜在员工进行培训和再教育，美国国土安全部认为需要优先培训信息安全和关键控制系统方面的先进知识。业界专家和管理机构都一致认为，健壮性和信息安全是未来智能电网需要关注的重点方向。

9.7 小结

本章指明了为实现电力系统不断地升级和发展所需要的研究和教育内容。为了提高对智能电网的认识，本章介绍了 9 个教育模块。本章还强调了更新现有员工的知识以及培训未来潜在员工的重要性。

参 考 文 献

[1] G. Heydt et al. "Professional Resources to Implement the 'Smart Grid,'" *NAPS Power Symposium*, 2009.

[2] J. Momoh. "Fundamentals of Analysis and Computation for the Smart Grid," *IEEE PES General Meeting*, 2010.

[3] J. Rosell and M. Ibanez. "Modeling Power Output in Photovoltaic Modules for Outdoor Operating Conditions," *Science Direct: Energy Conversion and Management* **2005**, 47, 2424–2430.

[4] M. Kaltschmitt, W. Streicher, and A. Wiese, eds. *Renewable Energy Technology, Economics and Environment*. Springer, 2007.

[5] G. Boyle. *Renewable Electricity and the Grid: The Challenge of Variability*, Earthscan, 2007.

第 10 章　智能电网的案例研究和试验平台

10.1　引言

为了实现智能电网的目标，相关的政策、标准、框架开发、新一代智能分析工具的评估等很多工作已经展开。在电力公司和政府机构的资助下，这些工作主要是为智能电网环境做准备，尤其是对现有电网进行升级改造和提高电网的效率。广域测量系统（WAMS）的安装和智能计量的升级是另外两个方面的工作，为此电力公司投入了大量的时间和资源。软件工具的开发与部署、验证环境和试验平台的建设，这些对于研究、教育和技术的发展都是非常重要的。

10.2　示范工程

早在 1996 年，与广域测量系统[1]和电压监视相关的示范项目就已经由美国能源部（DOE）完成可行性研究和项目设计。美国能源部提供了基金用于激励电力公司进行装备的技术升级，并资助学术机构进行科学研究。一些电力公司组织并投入使用的工程项目中应用了智能电表、配电自动化以及终端用户接入等技术[3]。

在 2009 年，美国能源部[2]提供的智能电网激励基金达到 6.2 亿美元。资助了两类示范项目：①完全集成的区域级智能电网，展示了通信技术、传感和控制设备、智能电表和家用监视系统、储能和可再生能源接入等；②电力公司规模的储能项目。

Commonwealth Edison、Dominion Virginia Power 和 Duke Energy 等三家电力公司各自获得的资助达到 1 千万～2 亿美元，主要用于智能电表项目。南加州爱迪生（Southern California Edison）和其他几个公司获得了用于同步相量装置、风能存储、需求响应、配电自动化和区域级智能电网示范工程的资助。由 San Diego Gas & Electric 与恩科（Cisco）、IBM 和 Arcadian Networks 等公司合作完成的 GridComm 项目开发了一个无线通信网络，用于支撑智能电网。

10.3　高级计量

Pepco 等公司正在投资智能电表的安装和集成。Pacific Northwest 智能电网示范

工程旨在验证智能电网新技术和新型商业模式的有效性，该示范工程在分布式电源、储能设备、用户资产和现有的电网设施之间实现了双向通信，同时量化了智能电网的成本和收益，提出了用于互操作和实现信息安全的标准。

10.4 含可再生能源的微网

如果微网能够为其中的负载提供足够的电能，那么它作为独立系统的可行性将会大大提高。微网的发展是面向用户侧系统的，它将智能电网的相关技术和功能应用于一处建筑或设施。开发一个完整的系统不仅包括实现智能电网的装置、设备和软件，还包括在社区内安装和改进高级计量系统以进一步变革配电系统。在大多数实施过程中，微网的发展包括改造基础设施、在系统内接入可再生能源等。支持这种活动的相关研究包括经济效益分析、网络性能的分析平台以及决策支持平台，上述两个平台构成了智能微网的系统基础。

图 10.1 描述了一个实验性微网的拓扑结构，它包含两套光伏设备和一套风电设备。在这个微网拓扑结构中[2]，必须配置储能技术，尤其是当微网处于孤岛运行状态。

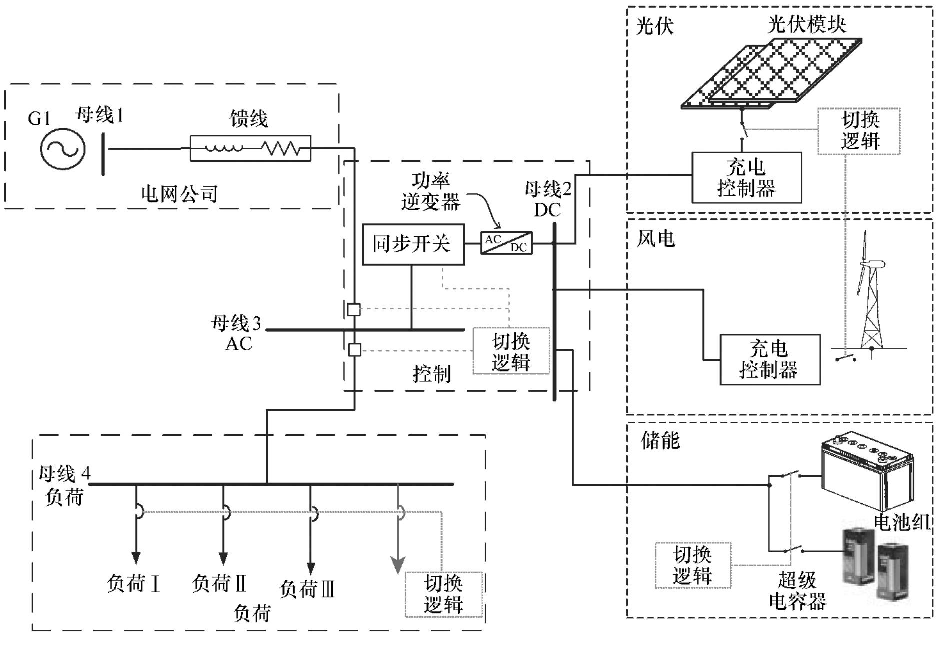


图 10.1 微网试验平台示例

10.5　电力系统的机组组合问题

机组组合问题的目标函数可以描述为所有机组起停成本之和随时间变化的函数，其数学表达式为[4,5]

$$F = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}[u_i(t)F_i(t) + S_i(t)]$$

机组组合优化问题的约束模型如下：

1）系统能量平衡：

$$0.5\sum_{i=1}^{N}[u_i(t)P_{gi}(t) + u_i(t-1)P_{gi}(t-1)] = P_{\mathrm{D}}(t)$$

2）电能和功率交换：

$$E_i(t) = 0.5[P_{gi}(t) + P_{gi}(t-1)]$$

3）旋转备用需求约束：

$$\sum_{i=1}^{N}u_i(t)P_{gi}(t) \geqslant P_{\mathrm{D}}(t) + P_{\mathrm{R}}(t)$$

4）机组发电约束：

$$P_{gi}^{\min} \leqslant P_{gi}(t) \leqslant P_{gi}^{\max}$$

式中，$t\in\{1, T\}$ 且 $i\in\{1, N\}$；F 为电力系统的总运行成本；$E_i(t)$ 为第 i 个机组在 t 时刻的电能输出；$F_i(E_i(t))$ 为第 i 个机组在 t 时刻的燃料成本；$u_i(t)$ 为输出功率和容量之比；N 为系统中的机组总数；T 为机组起停优化的总时间；$P_{gi}(t)$ 为第 i 个机组在时刻 t 的输出功率；$P_{gi}^{\max}$ 为第 i 个机组的最大输出功率；$P_{gi}^{\min}$ 为第 i 个机组的最小输出功率；$S_i(t)$ 为第 i 个机组在时刻 t 的起动成本。

在备用约束中，备用可分为旋转备用和需要锅炉冷起动的冷备用。

拉格朗日松弛法常用于求解机组组合优化问题。该方法对拥有很多机组的电力公司来说更为有用，因为随着机组数量的增加，利用该方法求得次优解的可能性逐渐降低。很容易就可以修改某电力公司的模型与特性，增加机组约束条件也相对容易。拉格朗日松弛法的缺点是它本质上不能保证获得最优解。

$$L(\lambda,\mu,v) = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}[C_i(P_{gi}(t)) + S_i(x_i(t))] + \lambda(t)\left(P_{\mathrm{d}}(t) + P_{\mathrm{R}}(t) - \sum P_{gi}\right) + \mu(t)(P_{gi}^{\max} - P_{gi})$$

式中，$\lambda(t)$、$\mu(t)$ 为 t 时刻的拉格朗日乘子。

使用自适应动态规划（Adaptive Dynamic Programming，ADP）方法求解机组起停优化问题：自适应动态规划方法能够在考虑噪声和不确定因素的条件下对系统进

行优化。如果用最优运行样本来训练自适应动态规划网络，该神经网络就能够学会调度员的调度模式对机组进行调度，并能根据负载的变化改变运行方式。图 10.2 是实现启发式动态规划（Heuristic Dynamic Programming，HDP）的示意图。执行网络的输入是机组的状态，行为是如何调整它们的输出。输出 J 表示要产生的代价函数，优化的目标是最小化 J 函数。

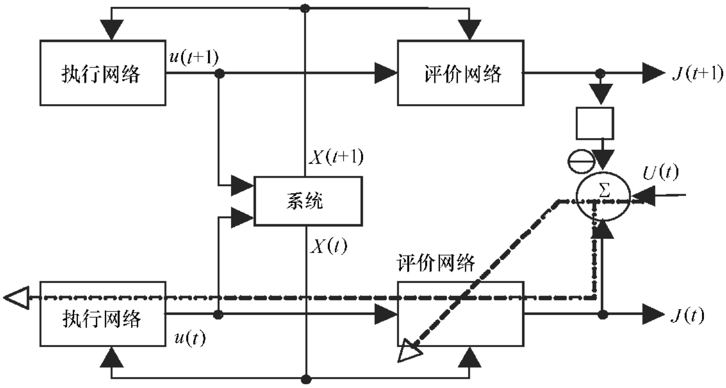


图 10.2 HDP 实现结构

在图 10.2 中，输入是网络的状态变量，它是发电成本向量，表示为 $X=[C(P_{gi})]$；输出是机组的控制变量，它用于调整机组的出力，表示为 $u=[\Delta P_g]$。评价函数是局部成本，它是机组在给定时间范围内的出力成本，表示为 $U=f(P, t)$。由以上分析，可知实现 HDP 需包括如下计算：

评价网络的误差为

$$e_C(t)=\gamma J(t)-J(t+1)-U(t)$$

由下式更新权重：

$$w_C(t+1)=w_C(t)+\Delta w_C(t)$$

$$\Delta w_C(t)=\eta e_C\left[-\frac{\partial e_C(t)}{\partial w_C(t)}\right]$$

式中

$$\frac{\partial E_C}{\partial w_{Cij}^{(1)}}=\frac{\partial E_C}{\partial e_C}\cdot\frac{\partial e_C}{\partial y_{Ck}}\cdot\frac{\partial h_{Ck}}{\partial h'_{Ck}}\cdot\frac{\partial h'_{Cj}}{\partial w_{Cij}^{(1)}}$$

$$=\gamma e_C\cdot\left[\frac{1}{2}(1-h_{Cj}^2)\right]\cdot w_{Cj}^{(2)}x_i$$

$$\frac{\partial E_C}{\partial w_{Cjk}^{(2)}}=\frac{\partial E_C}{\partial e_C}\cdot\frac{\partial e_C}{\partial y_{Ck}}\cdot\frac{\partial y_{Ck}}{\partial w_{Cjk}^{(2)}}=\gamma e_C y_{Ck}$$

I：R 向量中的元素个数；

J：隐层节点个数；

K：输出层节点个数；

M：u 向量中的元素个数；

h'_C：隐层的输入节点；

h_C：隐层的输出节点；

y'_C：输出层的输入节点；

y_C：输出层的输出节点；

$w_C^{(1)}$：输入层和隐层之间的权重；

$w_C^{(2)}$：隐层和输出层之间的权重；

x：输入层节点。

执行网络的误差可用下式计算：

$$e_A(t)=J(t)-U(t)$$

权重由下式更新：

$$w_A(t+1)=w_A(t)+\Delta w_A(t)$$

$$\Delta w_A(t)=\eta e_A\left[-\frac{\partial e_A(t)}{\partial w_A(t)}\right]$$

式中

$$\frac{\partial E_A}{\partial w_{Ajk}^{(2)}}=\frac{\partial E_A}{\partial e_A}\cdot\frac{\partial e_A}{\partial J_k}\cdot\frac{\partial J_k}{\partial y_{Ak}}\cdot\frac{\partial y_{Ak}}{\partial y'_{Ak}}\cdot\frac{\partial y'_{Ak}}{\partial w_{Ajk}^{(2)}}$$

$$=\gamma e_A h_{Aj}\cdot\left[\frac{1}{2}\left(1-h_{Aj}^2\right)\right]\cdot\left[\sum_{j=1}^{J}w_{Cj}^{(2)}\frac{1}{2}\left(1-h_{Cj}^2\right)w_{Cij}^{(1)}\right]$$

$$\frac{\partial E_A}{\partial w_{Aij}^{(1)}}=\frac{\partial E_A}{\partial e_A}\cdot\frac{\partial e_A}{\partial J_k}\cdot\frac{\partial J_k}{\partial y_{Ak}}\cdot\frac{\partial y_{Ak}}{\partial y'_{Ak}}\cdot\frac{\partial y'_{Ak}}{\partial w_{Aij}^{(1)}}$$

$$=\gamma e_A w_{Ajk}^{(2)}x_i\cdot\left[\frac{1}{2}\left(1-h_{Aj}^2\right)\right]\cdot\left[\frac{1}{2}\left(1-y_{Ak}^2\right)\right]\cdot\left[\sum_{j=1}^{J}w_{Cj}^{(2)}\frac{1}{2}\left(1-h_{Cj}^2\right)w_{Cij}^{(1)}\right]$$

相应的计算步骤如下：

第一步：用样本数据训练执行网络，误差是输出值和实际值之差。

第二步：用样本数据训练评价网络，该评价网络带有预先训练的、不变的执行网络。用式（7）~（12）更新权重。然后就可以在实际任务中应用成熟的 ADP 网络。

第三步：输入当前状态数据 $X(t)$ 给执行网络。

第四步：获得执行网络的输出 $u(t)$。再把 $u(t)$ 输入到系统函数中，获得下一

时刻的状态 $X(t+1)$。

第五步：用下一时刻的状态 $X(t+1)$ 获得下一时刻的行为 $u(t+1)$。

第六步：把不同时刻的行为 u 和状态 X，分别输入相应的评价网络，这样就可以获得不同时刻的 J 函数 $J(t)$ 和 $J(t+1)$。

第七步：反向传播和更新评价网络和执行网络的权重。然后更新时间 $t=t+1$。

结果：图 10.3（见参考文献［6］）描述了三机系统 HDP 中的神经网络结构。

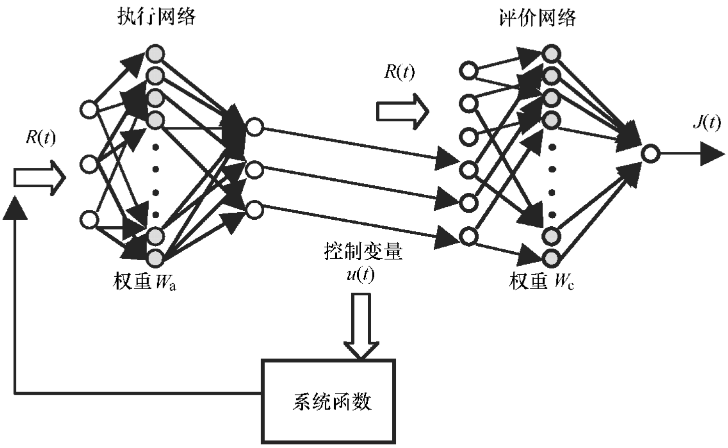


图 10.3　HDP 中的神经网络结构

图 10.4 描述了 3 机-6 节点系统的负荷曲线。图中的曲线极为接近，表明 ADP 方法得到的结果是正确的。

经过训练后，HDP 可以给出非常接近于最优值的发电计划。HDP 方法[4] 能够处理机组组合优化的动态过程，易于找到全局最优方案，而对于传统的优化方法来说，得到全局最优解是比较困难的。图 10.5 给出了 3 机系统的发电计划。

在图 10.5 中，X1、X2、X3 分别表示三台发电机的输出，而［X1］、［X2］和［X3］表示它们期望的（或最优的）输出。

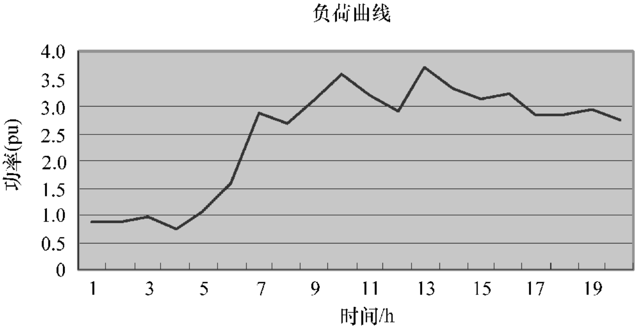


图 10.4　3 机-6 节点系统的负荷曲线

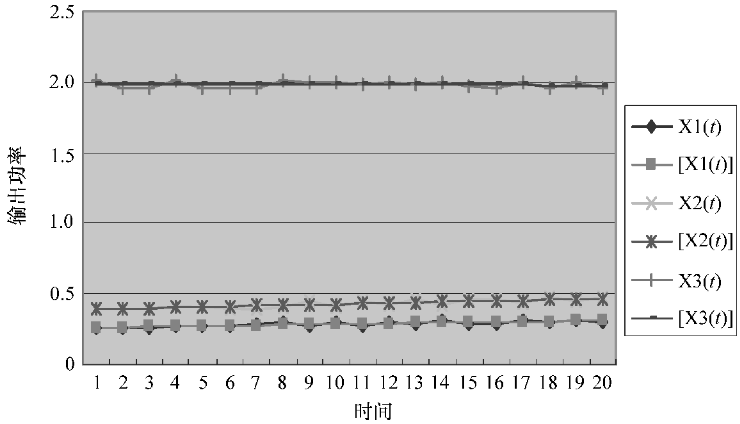


图 10.5 用 ADP 方法求解机组组合问题的解——发电计划

10.6 用于配网自动化最优网络重构的自适应动态规划

配网一般是辐射状网络结构，适于采用简单有效的保护方案。在正常运行条件下，馈线可能需要重构，以满足最小线损、最优电压断面以及缓解过负荷。最小线损可以表示为

$$\text{Minimize} \sum |z_b i_b|$$

约束条件为

$$[A] i = I$$

式中

z_b：支路阻抗。

i_b：支路 b 中的电流相量。

i：由支路电流相量构成的 m 维列向量。

A：$n \times m$ 维网络关联矩阵，每一项的值为：

= +1，如果支路 b 始于节点 p；

= −1，如果支路 b 止于节点 p㊀；

=0，如果支路 b 与节点 p 无关联。

m：支路的总数。

n：节点的总数。

I：由节点注入电流构成的 n 维向量。

参考文献［7］给出了使用整数内点法求解的例子。图 10.8 描述了用于 5 机

㊀ 原文此处有误，译者做了修改。

系统的 ADP 方法。

ADP 框架包括：a）执行网络；b）评价网络；c）用于网络重构的系统模型，如图 10.6 所示。

使用 ADP 方法求解该问题的算法如图 10.8 所示。

用 ADP 方法求解最优化网络重构问题，需要对图 10.8 中所示的构成系统结构的四个部分进行建模：执行向量、状态向量、直接收益和模型网络。分别用 5 节点和 32 节点系统进行测试。下面讨论了 ADP 实现的各个部分：

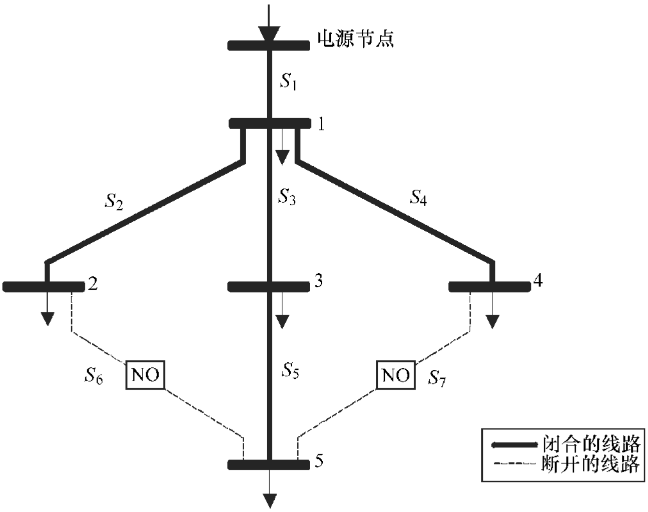


图 10.6　用于研究网络重构问题的小系统

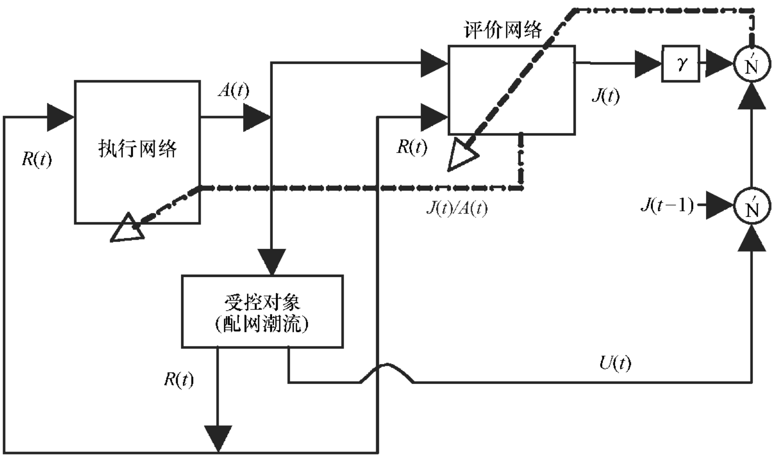


图 10.7　网络重构问题的 ADP 结构

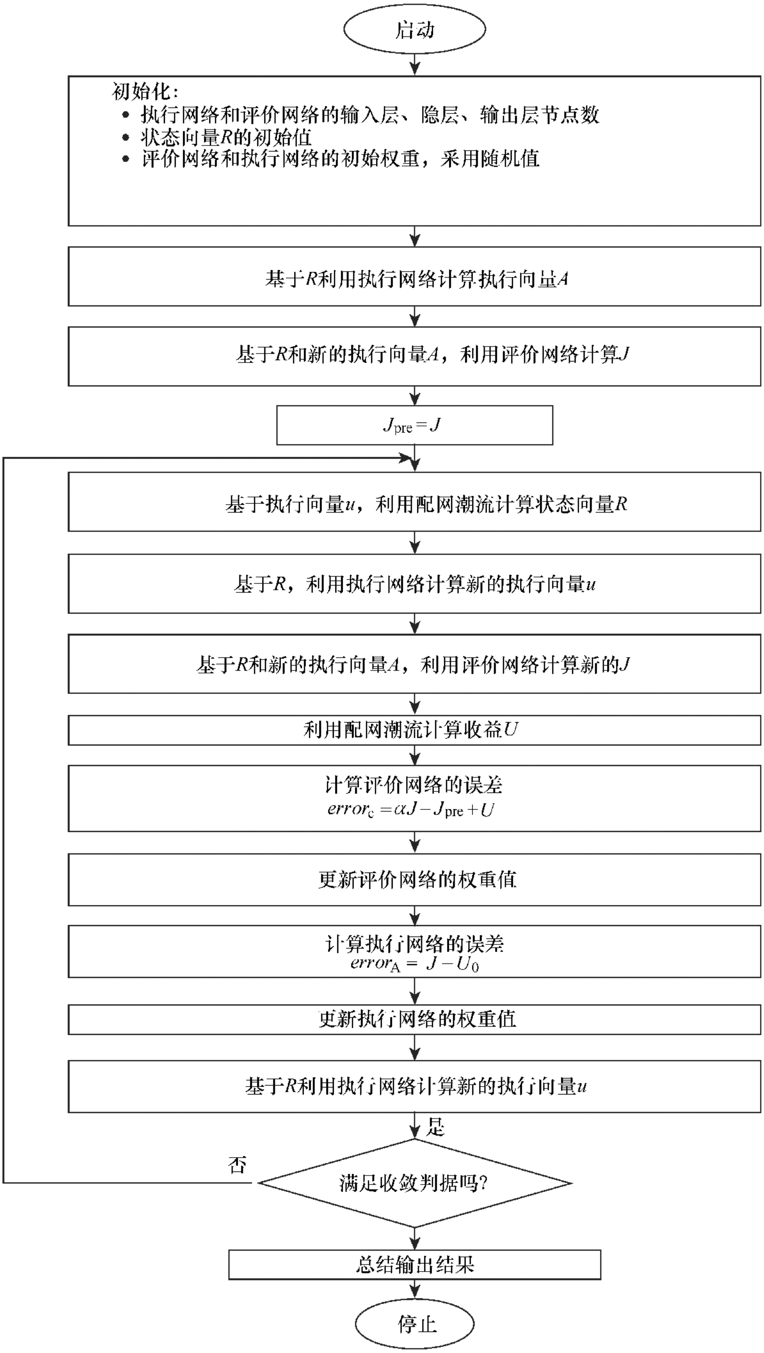


图 10.8　基于 ADP 的最优网络重构流程图

收益（评价函数）：最优重构需要选择最优开断支路集，即从每个环路中选出一条开断支路，使所获得的辐射状网络具有期望的性能。在需要考虑的网络重构的最优化目标中，我们选择有功功率损耗最小化作为优化目标。将 ADP 方法应用于辐射状配网最优重构问题涉及直接收益 U 的选取，以实现在整个优化过程中当总功率损耗达到最小值时 J 的迭代值也达到最小。因此可以用下式计算直接收益：

$$U = -\text{Total Losses}(\text{总损耗})$$

执行向量：如果每个控制变量 A_i 离散化后为 d_{u_i} 层（例如，将配网中的每个环断开一条支路，构成断开支路集），则影响配网潮流的执行向量总数为

$$A = \prod_{i=1}^{m} d_{u_i}$$

式中，m 表示控制变量的总数（例如，需要断开的支路总数）。

控制变量包括需要断开的支路集，每个环路一条支路。从上述简单网络中，我们可以很容易推导出所有执行向量，这些执行向量能够使配网保持辐射结构，具体组合如下：

A_1：{打开 2、3 开关，合上所有其他开关}

A_2：{打开 6、3 开关，合上所有其他开关}

A_3：{打开 2、5 开关，合上所有其他开关}

A_4：{打开 6、3 开关，合上所有其他开关}

A_5：{打开 2、4 开关，合上所有其他开关}

A_6：{打开 3、4 开关，合上所有其他开关}

A_7：{打开 6、4 开关，合上所有其他开关}

A_8：{打开 5、4 开关，合上所有其他开关}

A_9：{打开 2、7 开关，合上所有其他开关}

A_{10}：{打开 3、7 开关，合上所有其他开关}

A_{11}：{打开 6、7 开关，合上所有其他开关}

A_{12}：{打开 5、7 开关，合上所有其他开关}

部分仿真结果：该算法的目的是找到最优的开关状态组合，对于上述 5 节点的例子，最优解为执行向量 15。

图 10.9 说明了随着执行向量趋向于最优，总损耗也不断减小。初始化之后，执行网络随机产生第一个执行向量。接着，将该执行向量输入给带状态变量的评价网络。从评价网络 J 和直接成本 U 的输出，可获得执行网络和评价网络的新误差。这两个网络的权重可根据反向传播规则更新。经过充分的迭代后，系统将会给出输出结果，在本例中，即为最优执行向量，它是具有最小损耗的最优开关状态组合。

建议该研究可以扩展到大规模航空航天电力系统中，这类系统需要解决诸如故障恢复、网络重构和校正控制等多目标优化难题。

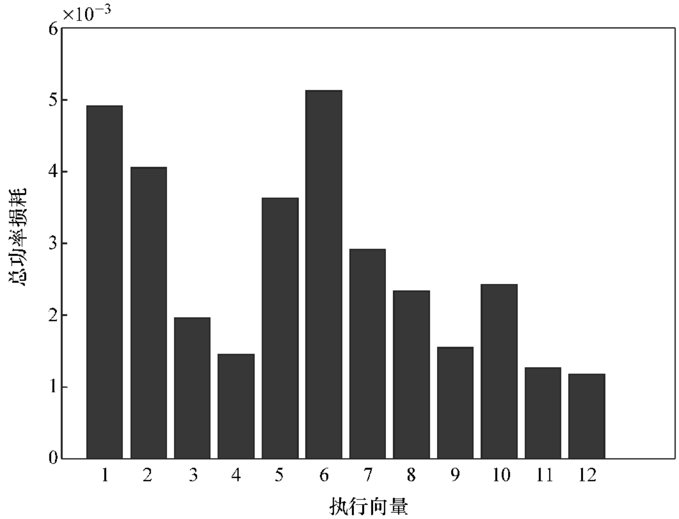


图 10.9　训练过程中执行向量的性能

10.7　可再生能源接入的案例研究

1）AEP 公司拥有特高压 765kV 电网，拥有 19000mile 的输电线路，还将建成 200～400GW 的大规模输电容量，从而可以显著提高风能在各种一次能源中的比重。AEP 估计在 2007 年投入约 600 亿美元。

2）Cape Wind 公司向成为美国第一海上风电供应商又迈进了一步，马萨诸塞州批准了一项与 National Grid 的购电合约，购买其输出电能的 50%，预计州最高法院会在 2011 年 12 月 31 日之前对 PPA 立法。

3）随着太阳电池板价格的持续下降，南加州爱迪生公司将转向更小的光伏电站。该公司最近签了一个 239.5MW 的合约，由 20 组小型太阳能电站供电。

4）一家英国电力公司正在开发电动跑车，由风力发电机提供动力，它在 2012 年打破了 139mile/h 的英国地面速度记录。

5）IHS Emerging Energy Research 认为，随着今明两年陆续有 45 个海浪和潮汐原型用于海洋发电测试，全球的海洋电力市场将会稳步启动。

6）美国海军正计划生产大约 10 艘（架）生物燃料和核能混合动力的舰艇、飞机和潜艇。

10.7.1　智能电网行动描述

在输电网中，智能电网技术将从两个重要方面创造价值：

1）大规模能源的直接互联。

2）利用远程传感技术（最终利用远方设备实现动态无功功率注入）改善潮流管理从而实现网络增容。

10.7.2 智能电网应用的实施方法

高级量测体系（AMI）：AMI 是对智能计量的统称。谈到智能电网，人们总会联想到电表或智能表计。这种关联关系有助于简化非常复杂的概念与过程，但智能电表仅仅是智能电网愿景的一部分。

智能电网不仅仅是计量设备，如同经济不仅仅是收银机。这两者都仅仅是汇聚点：买方和卖方的接口，数据在这里被收集和分析。无论是工业系统还是商业系统，我们都不可能对无法测量的系统进行改进。AMI 系统通常利用智能电表采集数据，为电力公司提供信息，并对用户是透明的。通常 AMI 系统都是基于各种无线系统构建的。随着 AMI 系统的实施，电力公司员工到家里抄表的日子将逐渐远去。

需求侧响应（DR）：目前的情况是，用户可以随时按需使用电能，电力公司也建立了发电厂和输电系统以支持这种需求，而无论成本多少或对环境有何影响。为了实现经济和环境的目标，在发电到用电的过程中，用户需要成为平等的参与者，调整他们的用电习惯，尽量使用清洁能源，尽量避开在峰荷时段用电。如果用电设备能够推迟到非峰荷时段，那么各方都会获益。虽然你可能需要一到家就开灯，但是你完全可以在电价和用电量都更低的凌晨 3 点钟再开启洗碗机。

这就是需求响应项目背后的合理性所在，并且它已经取得很大成功。研究已一次又一次地证明，当要求用户正确地使用电能时，他们总会配合。

例如，智能的温度调节装置可以提醒用户调低空调 1 ~ 2℃。到目前为止，一些美国公民仍在参与各类需求响应项目[5]。家用显示器和类似的设备可以降低电能消耗达 6%。需求响应项目在降低平均用电量方面显示了立竿见影的效果。

尖峰定价（Critical Peak Pricing，CPP）：是需求响应的一个分支，可以简单理解为，电力公司利用适当的技术，能够在峰荷期间对用电收取更高的费用。它允许用户自己决定是否宁愿在特殊的尖峰期间支付更多电费，而不是按平均电价支付。这有助于在用户和电力公司之间平衡成本和风险，同时也能激励用户降低能耗。

分时定价（Time-Of-Use Pricing，TOU）：分时定价与尖峰定价类似，只不过分时定价是对每一天的每小时定价。分时定价允许电价和收费根据用电时间来计算。分时电价不仅是针对一天的某个小时，还可能是不同的季节，甚至当地天气的变化，都会引起电价的调整，这正是需求响应的一种具体应用。

10.8 试验平台和评测系统

开发电力系统应用的计算工具需要进行广泛的测试，以验证其效率、速度、精度、可靠性和鲁棒性。需要通过特殊设计的测试系统，利用数据和用户对最终产品

进行测试。测试案例应考虑系统处于正常、报警、紧急和恢复等各种运行条件，并且使用公认的标准以满足互操作、信息安全以及管理上存在不确定性的要求。

我们希望继续开发基于 MATLAB 的环境[4,5]，以推广动态随机最优潮流、各种自适应动态规划方法、各种决策分析工具，并将其应用于各种民用和军用电网的试验平台和评测系统中。这部分研究结果将会在今后的另一本书中讨论，书名为《自适应随机优化技术及其应用（Adaptive Stochastic Optimization Techniques with Applications)》，它将为智能电网和其他复杂系统提供一个开发平台。

10.9　智能输电的挑战

在发展超级输电网络的过程中存在两个关键问题：①电网选址决策；②保证公平成本分摊的合理政策。这两个问题都需要经过委员会讨论，以授权联邦能源监管委员会（FERC）采取果断的行动。(详见美国能源部公告，http：//www. nappartners. com/news/doe-fercannounce-new-collaborative-effort-ontransmission-projects）

10.10　智能输电的益处

智能输电投资会使电能消费者和电力市场各方受益。虽然智能技术的类型和使用场所会有所区别，但是新的数字化技术装置的部署和本章所提到的功能的实现，都是为了实现如下目标：

1）提高可靠性；

2）在更低的输电成本下增加输电容量；

3）更高效地使用燃料发电，产生更少的气体排放；

4）更多地使用可再生能源和清洁电源，以更低的成本接入电网；

5）更有效地使用储能设备，降低峰荷时供电成本；

6）推动第三方参与电力系统；

7）培植批发和零售市场，提高电网连接、电价和电能消费等信息对消费者和电力市场各参与方的可用性。

10.11　小结

本章讨论了如何通过新技术，使现有的输电系统变得更加智能。这些智能电网技术大多数是经过充分测试的、成熟的、高效益的，它们的广泛使用将会使北美大型电力系统更加可靠、安全、高效、经济、多样和环境可持续。虽然通信、计算机分析工具[8]、传感器和控制都是关键要素，但这些单项技术本身[9]不可能把电能

从发电厂输送到终端用户。本章认为需要一个更强的平台集成架空线、电缆和变电站，既需要对现有输电基础设施进行投资，也需要投资建造新的线路和变压器。本章还阐明了需要把传统的输电技术和先进的智能电网要素结合起来，才能优化和提高输电投资的价值。

参考文献

[1] J.A. Momoh, M.E. El-Hawary, and R. Adapa. "A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993, Part I: Nonlinear and Quadratic Programming Approaches," *IEEE Transactions on Power Systems* 1999, 14, 96–104.

[2] J. Si, A.G. Barto, W.B. Powell, and D. Wunsch. *Handbook of Learning and Approximate Dynamic Programming*, Hoboken, NJ: Wiley, 2004.

[3] G.K. Venayagamoorthy, R. G. Harley, and D.C. Wunsch. "Dual Heuristic Programming Excitation Neuro-Control for Generators in a Multi-machine Power System," *IEEE Transaction on Industry Applications* 2003, 39, 382–394.

[4] J.A. Momoh. *Electric Power System Application of Optimization*, New York: Marcel Dekker, 2001.

[5] N.P. Phady. "Unit Commitment—A Bibliographical Survey," *IEEE Transactions on Power Systems* 2004, 19, 1196–1205.

[6] J.A. Momoh and Y. Zhang. "Unit Commitment Using Adaptive Dynamic Programming," *Proceedings of the IEEE Intelligent Systems Application to Power Systems (ISAP) Conference*, 2005.

[7] J.A. Momoh and A.C. Caven. "Distribution System Reconfiguration Scheme Using Integer Interior Point Programming Technique," *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2003, PES1, 7–12.

[8] Smart Grid Interoperability Standards Project, National Institute of Standards and Technology. January 2010.

[9] L. Karisny. "Will Security Start or Stop the Smart Grid?" *Digital Communities*, November 18, 2010.

第 11 章　后　　记

智能电网（Smart Grid），也称智慧电网（Intelligent Gird）或智能输电（Smart Transmission），正在全美范围受到多种行业的重视。作为一种全新的理念，其最初的设想和研究工作来自于公共事业公司、学术机构及其他利益相关方。各种支撑技术的研发经费主要来自于能源部提供的各种激励性资助项目。

智能电网要发展一些新型技术，如智能电表、地理位置监视设备、包括可再生能源在内的分布式能源，以及新型储能材料等。但利益相关方认识到，新技术开发需与其他工作相辅相成，如通信基础设施建设、对现有电网设备的升级改造以及建立用于系统互操作和系统集成的标准体系等。目前正在建立各种试验平台和验证环境。智能电网中的利益相关方还普遍认为，对现有人员的培训以及对未来人员的培养是非常重要的。

正如其他前沿技术一样，智能电网在发展中也必然面对很多挑战。例如：

1）在系统运行中为改善阻塞管理，尝试将多代理系统框架和自适应系统思想集成起来。

2）采用动态随机最优潮流（DSOPF）解决随机机组组合问题，以应对来自网络不确定性的挑战。这项技术可最终满足电网规划、运行、资源利用对鲁棒协同优化的需求。

3）变流器和新型保护方案的发展促进了微网技术的进步，并最终提高了电网效率。这里面还涉及微网能量管理系统（MEMS）㊀以及智能保护。

4）大型智能建筑和设备的研发，需要多个学科的交叉，如电气工程、机械工程、材料科学以及信息技术。

5）未来航空航天自动化领域的技术进展将促进智能电网领域的技术与设计的进步。

6）材料和关键部件的进步（如纳米技术）将促进储能技术的发展。

7）建立综合考虑技术因素和人为因素的动态随机模型，以此开展定价研究。深入研究边际成本收益和投入的关系。

8）为系统设计和实施实现工具、软件和硬件的标准化，以使智能电网能为公众和各利益相关方所接受。

9）由公共事业公司资助拥有交叉学科的学术研究机构，利用其便利的设施为

㊀ 原文为 Micro Electro-Mechanical Systems，根据上下文，应为 Microgrid Energy Management System（微网能量管理系统）。——译者注

现有的和未来的智能电网从业人员提供培训/再培训和教育机会。

新一代智能电网技术的重要特性需要通过一些综合示范来展示。这些特性已在本书中做过讨论，下面再列出一些：

1）更加广泛地应用数字信息和控制技术以提升电网的可靠性、安全性和运行效率。

2）在确保信息安全的前提下，在电网运行和资源利用中使用动态优化技术。

3）部署和集成分布式能源和发电（含可再生能源）。

4）开发和吸纳各种分布式能源、需求侧资源和能效资源。

5）在计量、电网运行和状态感知相关的通信网络、配网自动化等领域部署智能技术（指那些能够优化家电和用户端设备运行的实时、自动化、互动化技术）。

6）智能家电和用户端设备的集成。

7）部署、集成先进的储能和削峰技术，如 PHEV、具有储热能力的空调等。

8）向用户提供即时信息服务和控制选项。

9）为接入电网的家电和设备开发通信标准以实现互操作性。

10）发现那些阻碍智能电网技术、实践、服务进步的不合理或不必要的壁垒，降低甚至消除之。

一旦上述目标能够达到，我们就有信心建立一个真正智能的电网，其应用范围将扩大到航天、舰艇等系统，将惠及千家万户，提升整个社会的能源利用效率。

附录　缩 略 语 表

英文简称	英文全称	中文全称
AAM	Advanced Asset Management	高级资产管理
ADA	Advanced Distribution Automation	高级配电自动化
AI	Artificial Intelligence	人工智能
AGC	Automatic Generation Control	自动发电控制
AMI	Advanced Metering Infrastructure	高级量测体系
ANN	Artificial Neural Network	人工神经元网络
ANSI	American National Standards Institute	美国国家标准学会
ATO	Advanced Transmission Operation	高级输电运行
BPL	Broadband over Power Line	宽带电力线通信
CHP	Combined Heat-and-Power	热电联产
CIM	Common Information Model	公共信息模型
DA	Distribution Automation	配电自动化
DER	Distributed Energy Resource	分布式能源
DG	Distributed Generation	分布式发电
DMS	Distribution Management System	配电管理系统
DOE	U. S. Department of Energy	美国能源部
DR	Demand Response	需求响应
DSM	Demand Side Management	需求侧管理
DSB	Demand Side Bidding	需求侧竞价
EMS	Energy Management System	能量管理系统
EPRI	Electric Power Research Institute	美国电力科学研究院
EV	Electric Vehicle	电动汽车
FACT	Flexible Alternative Current Transmission Systems	柔性交流输电系统
GFA	Grid-Friendly Appliance	电网友好型电器
GIS	Geographic Information System	地理信息系统
GPS	Global Positioning System	全球定位系统
HAN	Home Area Network	用户户内网
IBM	International Business Machines	国际商业机器公司

（续）

英文简称	英文全称	中文全称
IEC	International Electrotechnical Commission	国际电工委员会
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	电气电子工程师学会
IED	Intelligent Electronic Device	智能电子装置
IP	Internet Protocol	互联网协议
ISO	Independent System Operator	独立调度机构
LAN	Local Area Network	局域网
MAS	Multi-Agent System	多代理系统
MPLS	Multi-Protocol Label Switching	多协议标签交换
NERC	North American Electric Reliability Corporation	北美电力可靠性协会
NIST	National Institute of Standards and Technology	美国国家标准技术研究院
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle	插电式混合动力电动汽车
PMU	Phasor Measurement Unit	相量测量装置
PNNL	Pacific Northwest National Laboratory	美国太平洋西北国家实验室
PV	Photovoltaic	光伏
QoS	Quality of Service	服务质量
RTO	Regional Transmission Organization	区域输电组织
RTU	Remote Terminal Unit	远方终端
RES	Renewable Energy Sources / System	可再生能源/系统
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition	数据采集和监控
SOA	Services Oriented Architecture	面向服务体系架构
SSA	Static Security Assessment	静态安全评估
TOU/TUP	Time of Use Pricing	分时电价
W3C	World Wide Web Consortium	万维网联盟
WAMS	Wide Area Measurement System	广域测量系统
WAN	Wide Area Network	广域网
XML	Extensible Markup Language	扩展标志语言

关于本书

作为新一代电网，智能电网能对接入电网的供需双方进行监视、预测并做出智能响应，从而提供可靠、高效和可持续的电能服务。本书以开发实际可运行的智能电网作为目标，阐述了进行方案分析和设计所需的基础知识。智能电网设计应满足政府、工业界以及用户等各方需求，而通过阅读本书，读者能在各种软件工具和技术方面获得指导，比如：

- 关键装置、系统和产品的设计标准和需求；
- 设计自适应智能电网所需的自动化技术与计算技术；
- 智能电网性能建模所需的仿真工具；
- 可持续、可再生能源的消纳技术；
- 对各种计算智能、通信技术和决策支持方案的评价。

针对不同的社会约束和能量需求，全书给出了智能电网设计与发展策略的详细实例。

日渐枯竭的化石能源供应导致了能源费用的上涨，高效、可持续的能源供应变得前所未有的重要。本书深入到智能电网的实际设计与实施层面而不仅仅停留在概念上，具有开拓性，是电气工程与电力工程领域专业人员和学生的必读书。此外，本书还可以帮助监管机构、政策制定者以及能源管理机构更好地理解未来的能量传输系统。

为中华崛起传播智慧

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037

电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

策划编辑◎刘星宁

国际视野 科技前沿

国际电气工程先进技术译丛

传播国际最新技术成果 搭建电气工程技术平台

《智能电网——设计与分析基础》
《功率理论与电能质量治理》
《混合动力电动汽车原理及应用前景》
《智能电网中的传导电磁干扰》
《风能转换技术进展》
《电机传动系统控制》
《储氢材料：储存性能表征》
《风力机技术》
《小型风力机：分析、设计与应用》
《通信系统高电压保护》
《磁性测量手册》
《ESD设计与综合》
《太阳能利用技术及工程应用》
《超级电容器的应用》
《小型风力机：分析、设计与应用》
《太阳电池、LED和二极管的原理：PN结的作用》
《风力发电系统 —— 技术与趋势》
《可持续电力系统的建模与控制：面向更为智能和绿色的电网》
《电力系统高级预测技术和发电优化调度》
《大规模储能技术》
《风电系统电能质量和稳定性对策》
《环境能源发电：太阳能、风能和海洋能》
《传热学：电力电子器件热管理》
《现代电力电子学与交流传动》
《功率半导体器件：原理、特性和可靠性》
《风能系统——实现安全可靠运行的优化设计与建设》
《储能技术》
《光伏系统工程》（原书第3版）
《光伏与风力发电系统并网变换器》
《车辆能量管理：建模、控制与优化》
《纯电动及混合动力汽车设计基础》（原书第2版）
《电动汽车技术、政策与市场》
《永磁无刷电机及其驱动技术》
《先进电气驱动的分析、建摸与控制》
《智能电网可再生能源系统设计》
《风力发电工程指南》
《用于制造固体氧化物燃料电池的钙钛矿型氧化物》
《太阳能物理》
《柔性交流输电系统在电网中的建模与仿真》
《风电并网：联网与系统运行》
《可再生能源的转换、传输和储存》
《海底电力电缆——设计、安装、修复和环境影响》
《光伏技术与工程手册》
《风力发电的模拟与控制》
《风电场并网稳定性技术》

GENUINE WILEY
W12473758

WILEY

Copies of this book sold without a Wiley Sticker on the cover are unauthorized and illegal

ISBN 978-7-111-44523-4

上架指导 工业技术/电气工程/电力技术

ISBN 978-7-111-44523-4

定价：58.00元